



UNIVERSITÄT BAYREUTH

Abteilung Mikrometeorologie

Jahresbericht 2009

zum Förderprojekt 01879

**Untersuchung der Veränderung der Konzentration von
Luftbeimengungen und Treibhausgasen im hohen
Fichtelgebirge**

2007 – 2013

Johannes Lüers & Thomas Foken

unter Mitwirkung von

Barbara Grasse & Paula Blumensaat



Arbeitsergebnisse

Nr. 43

Bayreuth, Juli 2010

Arbeitsergebnisse, Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie, Print, ISSN 1614-8916
Arbeitsergebnisse, Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie, Internet, ISSN 1614-8924
<http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/mm/>

Eigenverlag: Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie
Vervielfältigung: Druckerei der Universität Bayreuth
Herausgeber: Prof. Dr. Thomas Foken

Universität Bayreuth, Abteilung Mikrometeorologie
D-95440 Bayreuth

Die Verantwortung über den Inhalt liegt beim Autor.

1 Einleitung

Gemäß dem Förderungsantrag vom 12.10.2006, Punkt 2.1 und dem Bewilligungsbescheid vom 02.03.2007 wird für das Jahr 2009 ein Bericht vorgelegt, der im Wesentlichen auf zwei Aspekte der Veränderung der Luftschadstoffe eingeht. Darüber hinaus wird über den durch die Oberfrankenstiftung mitfinanzierten Ausbau der Messfläche nahe Voitsumra im Fichtelgebirge berichtet. Über die Veränderlichkeit des Kohlendioxidaustausches über Waldbeständen im hohen Fichtelgebirge wird wegen der Verknüpfung mit anderen Projekten nun doch erst 2010 berichtet. Sowohl bei der Berichterstattung als auch bei der Bearbeitung von Messdaten kommt es immer wieder zu Verzögerungen, da durch die Einführung der Bachelor-Studiengänge die Studierenden deutlich weniger Zeit für wissenschaftliche Arbeiten neben dem Studium haben.

2 Arbeitsbericht

Der Beginn der Förderung fällt zusammen mit dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Verbundprojekt „**ExchanGE** processes in mountainous **R**egions“ (EGER) unter den Projektbezeichnungen FO 226/16-1, ME 2100/4-1 und ZE 792/4-1 ab Anfang 2007 (<http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/eger/>). Das Projekt wurde Ende 2009 als DFG Paketantrag PAK 446 bis 2013 verlängert. Damit ist der Eigenanteil der Universität durch Investitionen auch in den folgenden Jahren gesichert.

Mit Mitteln der Oberfrankenstiftung wurde der Stromanschluss zur Messfläche Voitsumra im Frühsommer 2009 fertig gestellt. Dieser ermöglichte den Beginn des vom Freistaat Bayern finanzierten Klimaforschungsprojektes FORKAST „Auswirkungen des Klimas auf Ökosysteme und klimatische Anpassungsstrategien“, Teilprojekt 05 „Untersuchung der Kohlenstoffumsätze von Grünlandflächen im nordbayerischen Mittelgebirge unter extremen Klimabedingungen“ (Leitung: Prof. Foken, Prof. Kuzyakov). Dabei wurde die seit 1999 bestehende Klimastation durch eine Eddy-Kovarianz-Messung zur Bestimmung der Verdunstung und des Kohlenstoffaustausches ergänzt.



Abbildung 1.1: Klimastation Voitsumra (Hintergrund) mit Eddy-Kovarianz-Mast zur Bestimmung der Verdunstung und des Kohlendioxidaustausches. Der Schaltschrank der Stromzufuhr befindet sich in der hinteren rechten Ecke des Messfeldes (Norden), oberes Egertal westlich von Weißenstadt

Im Rahmen des o. g. EGER-Projektes fand vom 05. bis 08.10.2009 eine stark besuchte internationale Konferenz "Atmospheric Transport and Chemistry in Forest Ecosystems" im Schloss Thurnau statt (http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/ic_eger/).

Schwerpunkt in Jahr 2009 lag in der Weiterführung der lufthygienischen Messungen und der Weiterführung der im Bericht für 2008 bereits dargestellten Auswertungen. Hervorzuheben ist eine umfassende Studie zum Ozon, welches nicht nur ein Treibhausgas ist, sondern in Schönwetterperioden im hohen Fichtelgebirge immer wieder zu Konzentrationen deutlich über $180 \mu\text{g m}^{-3}$ führt (Diplomarbeit B. Grasse). Nach dem dramatischen Rückgang der SO_2 -Konzentrationen muss dem Ozon größte Beachtung geschenkt werden. Leider ist das schon recht alte Zweitgerät ausgefallen und nicht reparierbar, so dass in Kürze ein Antrag an die Oberfrankenstiftung um Aufstockung der bereitgestellten Summe zur Anschaffung eines Neugerätes gestellt wird. Diese Auswertungen wurden durch die 2007 begonnenen Messungen der nassen Deposition ergänzt.

Die Verdunstungsmessungen und Messungen der CO_2 -Aufnahme/Abgabe des Waldes wurden weiter ausgewertet. Die Arbeiten sind so weit vorangeschritten, dass sie in Kürze in einer wissenschaftlichen Publikation zusammengestellt werden können. Damit wird es gelingen nach mehreren Jahren ohne umfassende Förderung, die Daten der internationalen FLUXNET-Station Waldstein/Weidenbrunnen (internationales Kennzeichen: DE-Bay) wieder in internationale Datenbanken einzuspeisen. Verzögerungen traten immer wieder auf, da nicht genügend studentische Hilfskräfte zur Verfügung standen.

3 Nasse Deposition

Die Beschreibung der Messungen der nassen Deposition erfolgte bereits im Jahresbericht 2008 (Lüers und Foken, 2009). Die Probennahme erfolgte immer für vierwöchige Abschnitte entsprechend der Festlegung des Bayerischen Landesamtes für Umwelt. Somit gibt es pro Jahr 12 bis 13 Messperioden. Die nachfolgenden Tabellen zeigen für die Jahre 2008 und 2009 die gemessenen Niederschlagsmengen und Probenmengen des Wet-Only-Sammlers sowie die Spurenstoffanalyse, die wieder im Bayerischen Landesamt für Umwelt durchgeführt wurde.

Tabelle 3.1: Sammelzeitraum der Proben, Probenmenge und Niederschlag im Jahr 2008

Proben- Nummer	Beginn	Ende	Probenmenge [ml]	Probenmenge [mm]
1	29.12.2007	23.01.2008	2672	53
2	24.01.2008	20.02.2008	1480	30
3	21.02.2008	20.03.2008	5765	115
4	21.03.2008	16.04.2008	4675	94
5	17.04.2008	13.05.2008	1490	30
6	14.05.2008	11.06.2008	1500	30
7	12.06.2008	07.07.2008	3705	74
8	09.07.2008	06.08.2008	3565	71
9	06.08.2008	03.09.2008	4460	89
10	04.09.2008	01.10.2008	5610	112
11	29.10.2008	26.11.2008	2770	55
12	26.11.2008	24.12.2008	2150	43

Tabelle 3.2: Sammelzeitraum der Proben, Probenmenge und Niederschlag im Jahr 2009

Proben- Nummer	Beginn	Ende	Probenmenge [ml]	Probenmenge [mm]
1	24.12.2008	21.01.2009	1240	25
2	21.01.2009	18.02.2009	1675	34
3	18.02.2009	18.03.2009	2350	47
4	18.03.2009	15.04.2009	1634	33
5	15.04.2009	19.05.2009	5978	120
6	19.05.2009	12.06.2009	3780	76
7	12.06.2009	07.07.2009	3300	66
8	08.07.2009	05.08.2009	4191	84
9	05.08.2009	02.09.2009	1616	32
10	02.09.2009	30.09.2009	2200	44
11	30.09.2009	28.10.2009	3087	62
12	28.10.2009	25.11.2009	3467	69
13	25.11.2009	23.12.2009	2875	58

Tabelle 3.3: Ergebnisse der ICP MS in µg/m² im Jahr 2008

	Probe 01	Probe 02	Probe 03	Probe 04	Probe 05	Probe 06	Probe 07	Probe 08	Probe 09	Probe 10	Probe 11	Probe 12
Al	131.5	106.6	478.1	1454.0	286.0	764.0	1928.0	204.0	113.6	845.0	355.1	391.5
As	5.2	2.1	7.3	10.9	8.3	7.5	6.5	3.1	6.4	11.2	3.7	4.8
Bi	0.8	1.5	1.3	1.7	0.5	0.5	1.2	0.4	0.3	0.5	0.2	0.3
Ca	3820.3	2713.1	11078	11306	7787	7605	32493	13094	12435	27369	4593.2	4248.2
Cd	1.3	0.7	2.0	3.8	1.3	1.5	1.8	1.4	1.3	4.3	1.4	1.7
Co	1.0	1.9	2.0	3.7	1.1	1.6	11.4	4.8	51.7	156.1	3.0	6.7
Cr	<3.7408	2.4	<8.071	9.9	3.1	5.8	-	<4.99	<6.244	23.7	7.7	<3.01
Cu	42.4	30.0	76.4	217.0	40.0	63.0	138.0	94.0	86.2	108.2	46.2	398.2
Fe	262.2	117.5	518.6	1721.0	365.0	979.0	1207.0	434.0	211.3	641.9	244.2	518.1
K	3969.2	2468.1	9494.6	12997	1712.0	4134.0	3951.0	5339.0	5900.3	7789.4	3483.0	2327.2
Mg	3225.4	1313.3	6232.6	3108.0	1290.0	1771.0	4603.0	3140.0	2558.3	3785.0	3029.5	1517.9
Mn	64.5	49.6	140.4	135.0	68.0	169.0	232.0	127.0	121.4	261.5	69.8	64.5
Mo	3.4	3.2	6.5	6.4	2.3	<0.75	5.1	4.8	4.7	33.1	2.9	5.1
Na	24306	10308	41748	24382	2664.0	1237.0	6790.0	9507.0	9675.9	8440.7	16859	8730.6
Ni	14.0	6.1	26.2	38.5	12.7	14.7	29.8	29.6	28.5	42.8	15.2	14.9
Pb	39.9	18.9	60.4	286.1	36.8	42.7	82.2	28.4	20.1	77.4	34.9	42.5
Sb	6.1	1.5	11.2	8.4	4.0	4.6	4.9	3.8	5.1	9.7	3.8	2.5
Ti	3.9	15.4	7.6	27.9	7.2	36.9	41.7	6.2	6.1	10.1	3.6	4.4
V	13.3	7.6	18.1	16.7	5.4	8.3	16.1	11.1	10.5	33.8	12.5	9.5
Zn	231.9	208.9	524.7	1242.0	175.0	183.0	778.0	292.0	369.8	611.8	221.9	303.4

Tabelle 3.4: Ergebnisse der ICP MS in µg/m² im Jahr 2009

	Probe 01	Probe 02	Probe 03	Probe 04	Probe 05	Probe 06	Probe 07	Probe 08	Probe 09	Probe 10	Probe 11	Probe 12	Probe 13
Al	188.8	164.7	402.5	140.5	743.4	201.2	480.5	411.1	347.2	391.4	354.0	242.8	305.0
As	2.8	3.4	10.0	3.4	13.0	6.3	8.2	5.2	2.8	17.7	6.3	14.4	6.6
Bi	0.1	0.2	0.4	0.2	0.9	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.5	<0.347	<0.287
Ca	1782	1678	4936.6	5338.0	21477	37567	11667	21650	12875	5589.5	33296	5104.8	6944.6
Cd	0.9	3.2	2.9	0.6	3.6	12.0	8.2	2.1	1.0	5.3	5.5	3.5	4.9
Co	3.1	1.2	12575	1.3	11.7	14.0	16.9	3.0	1.6	1.5	1.6	2.1	1.1
Cr	<1.74	<2.35	5.0	3.8	<8.369	<5.292	<4.62	11.1	3.4	<3.08	<6.174	<6.934	<5.75
Cu	104.0	176.9	127.3	33.1	153.4	519.9	1126	145.3	92.7	115.8	145.7	68.7	5527.8
Fe	190.3	188.2	485.3	236.8	874.8	300.2	641.8	457.1	325.0	<220	395.3	<346.7	368.4
K	15212	1225	2463.3	1270.3	16606	8724.9	3206	4572.2	2102	2432.3	8168.2	3121.0	2926.6
Mg	1131	931.9	2439.2	1412.3	3701	6751.8	2121	2996.5	1326	1204.4	3882.8	1204.4	2323.3
Mn	47.1	30.0	63.7	52.1	288.6	142.9	139.7	150.2	95.4	98.4	124.5	96.0	72.9
Mo	2.1	1.4	4.1	4.0	3.8	8.6	8.6	7.2	3.0	<4.4	4.1	1.9	2.2
Na	7861.2	7701.2	25712	10132	9539.1	13560	3856.4	13413	2238.7	5432.6	18528	7308.4	8273.1
Ni	6.5	10.8	39.9	8.4	94.6	37.4	25.1	25.0	11.2	14.4	14.2	26.1	14.6
Pb	22.3	43.7	78.9	12.0	75.1	41.2	73.9	26.8	13.7	79.7	47.1	37.2	98.4
Sb	1.7	2.3	7.8	2.7	9.2	4.3	2.6	4.0	3.0	6.2	5.9	4.0	5.0
Ti	3.6	4.2	9.1	6.7	18.8	4.1	12.2	6.3	5.6	<8.8	<30.87	<34.67	<28.75
V	5.6	5.5	19.3	9.0	20.1	15.2	7.8	16.4	12.7	9.0	18.2	6.3	7.9
Zn	115.5	8123.5	499.0	108.9	1714.6	2933.1	2554.1	360.3	248.7	949.3	318.3	588.3	11573.1

Tabelle 3.5: Ergebnisse der Ionenchromatographie in mg/m² des Jahres 2008

	Probe 01	Probe 02	Probe 03	Probe 04	Probe 05	Probe 06	Probe 07	Probe 08	Probe 09	Probe 10	Probe 11	Probe 12
Chlorid	33.7	8.9	73.8	29.0	<6.0	<6.0	-	17.1	<17.84	<22.44	29.9	11.2
Nitrit	<2.672	<1.48	<5.765	<4.68	<1.49	<1.50	-	<3.57	<4.46	<5.61	<2.77	<2.15
Nitrat	93.5	43.8	206.4	241.0	72.0	90.0	142.0	129.0	112.4	172.8	106.9	104.5
Phosphat	<10.69	<5.92	<23.06	<18.7	<6.0	<6.0	-	<14.3	<17.84	<22.44	<11.08	<8.6
Sulfat	57.7	22.5	98.0	96.3	38.7	54.9	69.5	62.0	51.7	127.9	51.5	36.1
Natrium	25.1	6.8	47.3	23.4	<3.0	<3.0	-	10.0	8.9	<11.22	18.8	7.3
Ammonium	28.3	12.7	84.2	95.4	35.5	54.0	57.0	49.2	44.6	65.1	30.5	19.4
Kalium	<10.69	<5.92	<23.06	<18.7	<6.0	6.0	-	<14.3	<17.84	<22.44	<11.08	<8.6
Magnesium	3.7	<1.48	8.1	4.7	1.5	1.8	-	3.6	<4.46	5.6	3.3	<2.15
Calcium	5.3	3.3	13.8	10.3	8.0	7.2	29.3	15.7	13.4	22.4	6.1	4.7

Tabelle 3.6: Ergebnisse der Ionenchromatographie in mg/m² des Jahres 2009

	Probe 01	Probe 02	Probe 03	Probe 04	Probe 05	Probe 06	Probe 07	Probe 08	Probe 09	Probe 10	Probe 11	Probe 12	Probe 13
Chlorid	9.42	12.73	33.84	16.01	<23.9	21.17	<13.2	20.96	<6.46	9.24	27.17	<13.9	12.65
Nitrit	<1.24	<1.67	<2.35	<1.63	<5.97	<3.78	<3.3	<4.19	<1.61	<2.2	<3.08	<3.47	<2.88
Nitrat	64.98	93.47	212.4	89.22	234.3	144.4	122.8	115.7	88.23	122.3	124.7	64.49	147.8
Phosphat	<4.96	<6.7	<9.4	<6.54	<23.9	<15.1	<13.2	<16.8	<6.46	<8.8	<12.4	<13.9	<11.5
Sulfat	22.57	30.49	83.66	37.26	125.5	86.94	84.48	65.38	37.49	112.6	73.47	40.91	56.35
Natrium	6.70	8.38	23.97	10.13	11.96	14.36	<6.6	11.73	<3.23	5.72	21.61	7.63	9.78
Ammonium	14.38	18.43	74.26	45.10	104.0	68.80	47.52	46.10	47.83	61.60	87.05	<6.93	28.18
Kalium	<4.96	<6.7	<9.4	<6.54	<23.9	<15.1	<13.2	<16.8	<6.46	<8.8	<12.3	<13.9	<11.5
Magnesium	1.24	<1.68	2.35	2.61	5.98	7.56	3.30	5.87	2.59	2.20	4.32	<3.47	3.45
Calcium	3.22	<3.35	<4.7	6.86	27.50	30.24	12.54	19.28	13.25	9.24	36.43	6.93	10.93

4 Lufthygienische Messungen

Im Jahresbericht 2008 (Lüers und Foken, 2009) wurde der erste Bearbeitungsteil der lufthygienische Messungen, ihre Bedeutung und Erfassung und Trendentwicklung umfassen erläutert, so dass hier auf eine Wiederholung verzichtet werden kann.

4.1 Konzentrationsmessungen Ozon, Stickoxide, Schwefeldioxid

4.1.1 Gerätesatz Stand 2009/2010

Am Standort Waldstein/Pflanzgarten wird unverändert zum vorherigen Jahr auch 2010 zur Ermittlung der Ozonkonzentration das UV Absorption OZONE ANALYZER Model M400 der Firma Teledyne-API eingesetzt. Die Erfassung der NO₂- und NO-Konzentrationen erfolgt mittels Chemilumineszenz NO/NO_x-Analysator CLD 700 AL von TEKAN. SO₂-Konzentrationen werden durch einen Trace Level Pulsed Fluorescence SO₂-Analyzer Model 43C von Thermo Environmental Instruments Inc. gemessen. Dieser Gerätesatz wurde bereits im Jahre 2000 bzw. 2002 aus anderweitigen Drittmitteln beschafft und konnte erst Anfang 2008 am Waldstein/Pflanzgarten in Routinebetrieb gehen. Dies wurde notwendig, da der erheblich überalterte Gerätesatz (in Betrieb 1986 bis 2007) aus dem Wartungsprogramm der Hersteller gestrichen wurde und eine Wartung, Reparatur oder Kalibrierung nicht mehr möglich war. Dies führte letztlich zu einem Komplettausfall der Altgeräte. Der 2010 laufende Gerätesatz ist zwar ebenfalls im Vergleich zu aktuellen Modellen technisch veraltet, erfüllt aber noch alle Standards. Da nur noch ein Gerätesatz zur Verfügung steht, muss durch halbjährlich oder jährlich notwendige Gerätewartungen der Messbetrieb entsprechend der Wartungs- und Reparaturzeit unterbrochen werden (i. d. R. ein Monat). Für einen Betrieb über 2010 hinaus muss zudem über eine Modernisierung (Neukauf) der Ozon- und NO_x-Analysatoren angedacht werden.

4.1.2 Datengrundlage, Datenqualität und Datenkorrektur

Die Datengrundlage, Datenqualität und Datenkorrektur bezüglich der Routinemessungen der Spurengase Ozon, NO_x und SO₂ wurden im Jahresbericht 2008 (Lüers und Foken, 2009) umfassen erläutert, so dass hier auf die Wiederholung verzichtet werden kann.

4.1.3 Zeitliche Entwicklung und Trendanalyse

Die zeitliche Entwicklung und Trendanalyse der Spurengase Ozon, Stickoxide und Schwefeldioxid wurden im Jahresbericht 2008 (Lüers und Foken, 2009) umfassen erläutert, so dass auch hier auf die Wiederholung verzichtet werden kann.

5 Spezielle Auswertung von Ozon

5.1 Auswertung des Jahresgangs hinsichtlich AOT40-Schwellwert

Da nach der gesetzlichen Regelung im Jahr 2004 der BImSchV ab dem Jahr 2010 der AOT40 (Accumulated exposure Over a Threshold of 40 ppb) von $18000 \mu\text{g h m}^{-3}$ (9000 ppb h) nach Möglichkeit einzuhalten ist und als Zielwert zum Schutz der Vegetation vor bodennahem Ozon gilt und als langfristiger Zielwert $6000 \mu\text{g h m}^{-3}$ (3000 ppb h) vorgesehen ist, sei hier an dieser Stelle zunächst der Verlauf der AOT40-Werte basierend auf Stundenmitteln des Zeitraumes Mai bis Juli nach gesetzlicher Definition aufgeführt (Beck, 2005). In Karlsson et al. (2004) wird ein AOT40-Schwellwert zwischen 2000 und 5000 ppb h zum Schutze der Vegetation gefordert, da sensible Baumarten bei dauerhafter Belastung in dieser Höhe noch mit einer Reduktion von ca. 3 bis 6 % der Biomasseproduktion reagieren. In Abbildung 5.1 ist die Entwicklung des AOT40 nach Definition der BImSchV 6.1.33 § 2 Abs. 2 aufgeführt. Ende der 1980er Jahre waren AOT40-Werte um 7000 ppb h zu beobachten. Zu Beginn der 1990er Jahre traten jedoch stark erhöhte Werte bis über 20000 ppb h auf, die sich im Verlauf der 1990er Jahre auf Werte von ca. 16000 ppb h im Jahre 2000 abschwächten und einen weiteren starken Rückgang bis zum Jahr 2003 auf unter 5000 ppb h aufwiesen. Die Jahre 2005 und 2006 zeigten ein erneutes erhöhtes Niveau der AOT40-Werte. Die Einhaltung des AOT40 Zielwertes von 9000 ppb h ab dem Jahre 2010 scheint nach den Überschreitungen in den 1990er Jahren um mehr als das Doppelte nun mit den vorwiegend deutlich geringeren Werten nach dem Jahr 2000 im Rahmen des Möglichen zu sein.

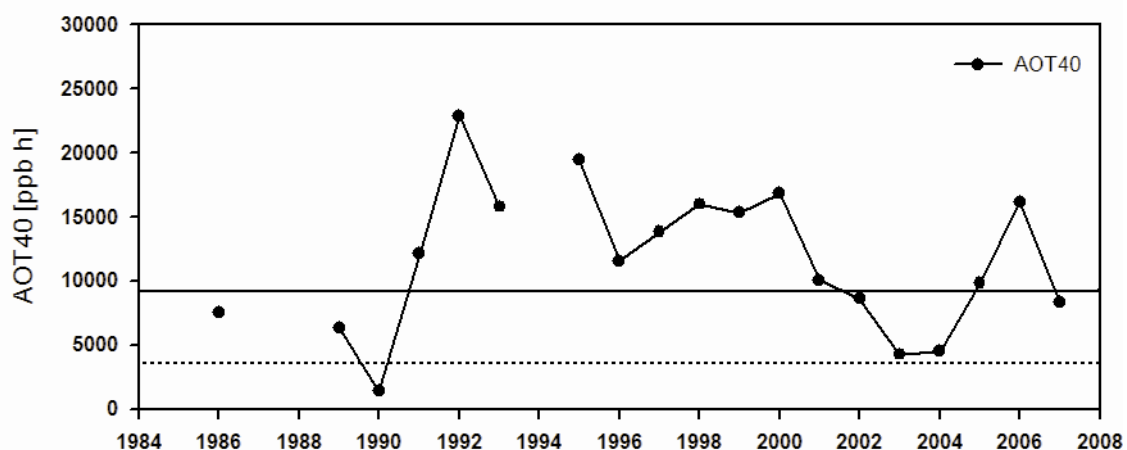


Abbildung 5.1: AOT40 (Summe der 1h-Mittel von Ozon über 40 ppb im Zeitraum Mai bis Juli) von 1986 bis 2007. Als durchgezogene Linie ist der Zielwert zum Schutz der Vegetation vor bodennahem Ozon von $18000 \mu\text{g h m}^{-3}$ (ca. 9000 ppb h), als gestrichelte Linie der langfristige Zielwert von $6000 \mu\text{g h m}^{-3}$ (ca. 3000 ppb h) nach der BImSchV dargestellt.

Auf Grund des Zusammenhanges des Verlaufes der Ozonkonzentration mit dem Verlauf der Globalstrahlung treten dauerhafte bzw. langfristige Überschreitungen des Schwellwertes von 40 ppb ausschließlich in den Sommermonaten auf.

Die Termine der jeweils ersten langfristigen Über- bzw. Unterschreitung von 40 ppb im Jahresverlauf zeigen interessante Entwicklungen im Zuge der Jahre (Abbildung 5.2). Bis zum Jahr 2000 wurde der Schwellwert von 40 ppb im Durchschnitt zwischen dem 04. April und dem 05. September in einer Zeitspanne von 154 Tagen bei über 21 Tage tiefpassgefilterten Daten überschritten. Ab dem Jahr 2000 erfolgte bis zum Jahr 2007 eine Halbierung dieses Überschreitungszeitraumes auf nur mehr 88 Tage mit langfristiger Überschreitung von 40 ppb. Eine Überschreitung des 40 ppb Schwellwertes fand im Mittel nur noch zwischen dem 09. Mai und dem 05. August statt. Beide Termine haben sich aus dem Frühjahr bzw. Herbst mehr in Richtung Jahresmitte verschoben und bedingen dadurch eine Einengung der zeitlichen Überschreitungsspanne. Bei Betrachtung zweier Beispieljahre (1997 und 2004) wird zusätzlich eine deutliche Absenkung des Ozonniveaus in den Sommermonaten im Zuge der Jahre offensichtlich (Abbildung 5.3). Bis zum Jahr 1999 fanden regelmäßig lang andauernde Überschreitungsphasen von 40 ppb statt. Seit dem Jahr 2000 traten lediglich sporadische Überschreitungen des Schwellwertes von 40 ppb bei deutlich verringertem Niveau auf. Zu erklären ist diese Entwicklung mit der Verringerung der jährlichen Summe der Globalstrahlung (1997: 5.5 MW m^{-3} , 2004: 4.8 MW m^{-3}) mit besonders stark hervortretender Abnahme im August (vgl. Jahresbericht 2008).

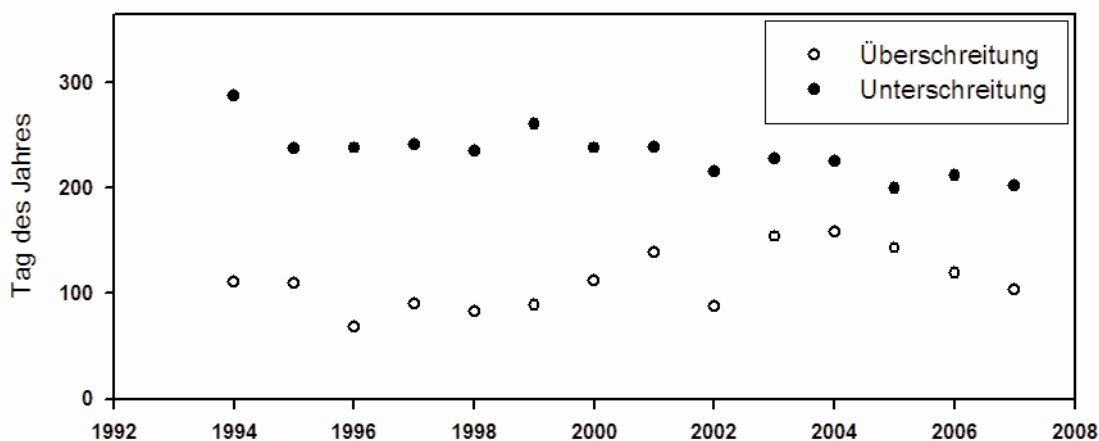


Abbildung 5.2: Termine der ersten dauerhaften bzw. langfristigen Über- und Unterschreitung von 40 ppb im Jahresverlauf von Ozon in Tagen des Jahres und als über 21 Tage tiefpassgefilterte Werte der Station Waldstein/Pflanzgarten von 1994 bis 2007.

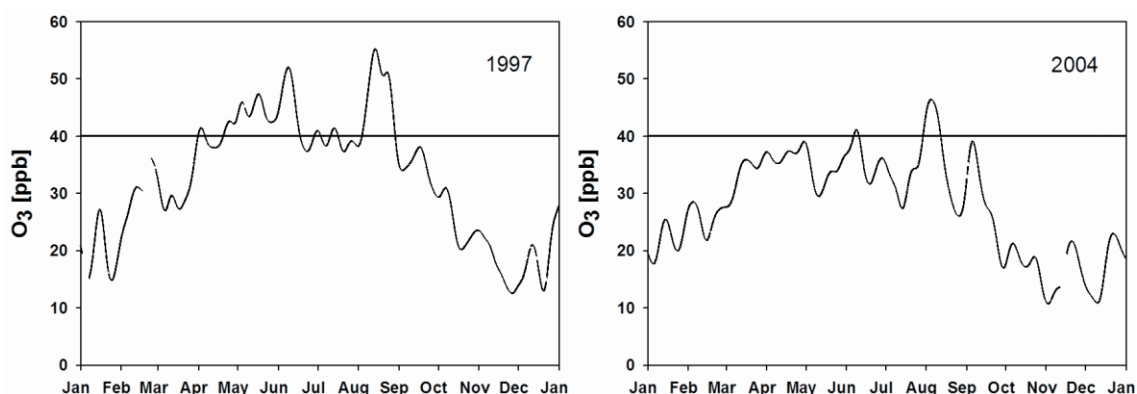


Abbildung 5.3: Vergleich der Ozonjahresgänge in ppb und als über 21 Tage tiefpassgefilterte Werte der Station Waldstein/Pflanzgarten der Jahre 1997 und 2004. Durchgezogene Linie: Schwellwert von 40 ppb.

Begründet werden kann die Reduzierung der Summe der Globalstrahlung mit im Zuge des einhergehenden Klimawandels erhöhten Lufttemperaturen in Mitteleuropa und dem folglich höheren Wasserdampfgehalt in der Luft. In Folge dessen wird ein erhöhter Anteil der einfallenden Strahlung absorbiert. Zusätzlich führt vermehrte Wolkenbildung zu erhöhter Reflexion der Globalstrahlung (Beierkuhnlein und Foken, 2008).

5.2 Auftreten der absoluten Minima und Maxima im Jahresverlauf

Die absoluten Minima bzw. Maxima der Ozonkonzentration im Jahresverlauf treten durch den Einfluss meteorologischer Größen und deren jahreszeitlicher Variation relativ konstant zu regelmäßigen Terminen auf (Abbildung 5.4). Im Falle der Maxima war dies bei Auftreten einer stark ausgeprägten strahlungsreichen und trockenen Erstfrühlingsepisode nach der Definition der phänologischen Jahreszeiten des Deutschen Wetterdienstes für Deutschland am Waldstein in der Regel um den 28. April.

Das Zustandekommen ausgeprägter Frühlingsmaxima wurde bereits durch mehrere Autoren diskutiert (Monks, 2002; Vingarzan, 2003). Die letztendlichen Ursachen scheinen aber noch nicht endgültig geklärt zu sein. Es wird jedoch im Wesentlichen die Kombination zweier wichtiger Beitragsformen angegeben. Zum einen der erhöhte Gehalt der Luft an in den Wintermonaten durch vermehrte Verbrennung fossiler Brennstoffe akkumulierter Vorläufersubstanzen (anthropogen bedingte Stickoxide und Kohlenwasserstoffe) in Verbindung mit starkem Strahlungsaufkommen (stark ausgeprägte Erstfrühlingsepisode) und der somit einhergehenden ausgeprägten photochemischen Ozonbildung. Zum anderen die vermehrte Einmischung ozonreicher, stratosphärischer Luftmassen durch turbulente Bedingungen in der Troposphäre in Folge von geballt auftretenden Frühjahrsunwettern im Zusammenspiel mit einer noch tief liegenden Tropopause (Monks, 2004; Vingarzan, 2003).

Bei nur geringer Ausprägung dieser klassischer Weise auftretenden Erstfrühlingsepisode ist das absolute Ozonmaximum weiter in Richtung der Sommermonate verschoben und trat im Mittel um den 06. August in Folge einer intensiven und strahlungsreichen Hochsommerepisode (Hundstage) bei Temperaturen bis um 30 °C am Standort Waldstein/Pflanzgarten auf. Die durch die erhöhte Temperatur induzierte verstärkte VOC-Produktion durch den Fichtenforst und die erhöhte Geschwindigkeit der photochemischen Reaktionen (Olszyna et al., 1997) in Kombination mit hohem Strahlungsaufkommen und somit ohnehin hochgradiger photochemischer Ozonbildung führt zur Ausbildung des absoluten Ozonmaximums im Jahresverlaufes bei stark ausgeprägten Hochsommerepisoden (Abbildung 5.4).

Herbinger et al. (2005) zeigen, dass zweijährige Buchenschösslinge im Vergleich zu erwachsenen Buchen eine höhere stomatare Durchlässigkeit aufweisen und bei Exposition mit höherer Ozonkonzentrationen insgesamt leichte Abschwächung der Photosyntheseleistung stattfindet. Weitere Schädigungsanzeichen, Reaktionen und Beeinträchtigungen von Pflanzen durch den Einfluss des Ozons wie Blattschädigung, Wachstumsverringern oder Beeinträchtigung von Enzym- oder Stoffwechselreaktionen sind in unzähligen Arbeiten untersucht und dokumentiert worden (Augustaitis und Bytnierowicz, 2008; Dawnay und Mills, 2009; Fuhrer et al., 1997; Gerosa et al., 2008; Kitao et al., 2009; Klumpp et al., 2006; Matyssek et al., 2006; Utiyama et al., 2004; Wang et al., 2008).

Bei Annahme, dass junge Pflanzen einer erhöhten Gefährdung durch Ozon bedingt durch ihre höhere stomatäre Leitfähigkeit ausgesetzt sind (Herbinger et al., 2005), lässt sich die Vermutung aufstellen, dass im Falle vermehrten Auftretens der Ozonmaxima im Frühjahr im Zuge veränderter Witterungsverläufe durch ablaufende Klimaänderung Pflanzenkeimlinge in besonderer Weise nachteilig beeinflusst werden.

Das absolute Minimum im jährlichen Verlauf der Ozonkonzentration trat konstant um den 24. November auf. Der Monat November war zusammen mit dem Monat Dezember am Waldstein über die Jahre hin gesehen derjenige Monat, mit der höchsten Anzahl an Nebeltagen im gesamten Jahr. Im Durchschnitt waren im November in etwa 20 Tage als Nebeltage (mindestens ein 10-min Wert der Sichtweitenerfassung unterhalb 1000 m) am Waldstein zu werten (Foken, 2003). Auch Böer und Vesecký (1973) geben die durchschnittlich höchste Anzahl der Nebelstunden für die Monate November mit 452 Stunden und Dezember mit 475 Stunden für den Fichtelberg im mittleren Erzgebirge an. Das ohnehin verringerte Strahlungsangebot bedingt durch die Kürze der Tage zu dieser Jahreszeit und das überproportionale Auftreten von Nebelbildung an der Station Waldstein/Pflanzgarten bzw. der Lage der Station innerhalb oder unterhalb der Wolkendecke führt zur Ausprägung des absoluten Ozonminimums Jahresverlauf im November (Abbildung 5.4).

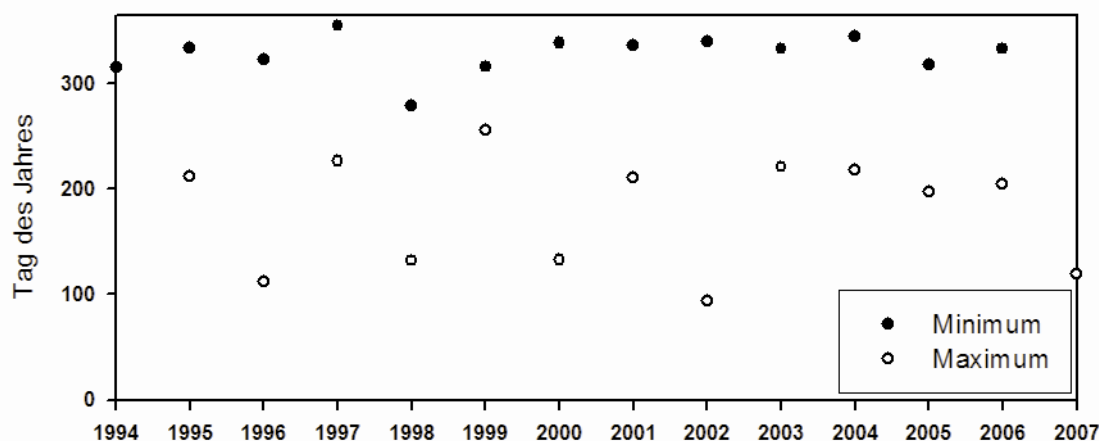


Abbildung 5.4: Eintrittstermine der absoluten Minima und Maxima im Jahresverlauf der Ozonkonzentration in Tagen des Jahres und als über 21 Tage tiefpassgefilterte Werte der Station Waldstein/Pflanzgarten von 1994 bis 2007.

5.3 Mittlere monatliche Tagesgänge

Neben den jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt Ozon außerdem einem regelmäßigen Tagesgang mit mittleren Maximalwerten zwischen 12:00 und 16:00 Uhr am Nachmittag und mit mittleren Minimalwerten in der Regel zwischen 03:00 und 07:00 Uhr in den Morgenstunden. Der sich Tag für Tag wiederholende Verlauf der Ozonkonzentration wird prinzipiell durch die Sonneneinstrahlung gesteuert. Tagsüber findet photochemische Ozonbildung und nachts Abbau über in erster Linie NO und Deposition an Oberflächen statt. Durch Ausstrahlung an der Erdoberfläche der über den Tag in den obersten Zentimetern des Erdbodens gespeicherten Wärme, kommt es in der Regel zur Ausbildung einer stabilen nächtlichen Schichtung im untersten Abschnitt der Troposphäre (Foken, 2006; Hastie et al., 1993; Stull, 2000). Die Stabile Schichtung verhindert den Austausch mit darüber liegenden Luftmassen, die durch Einmischung von Luft stratosphärischen Ursprungs deutlich höhere Ozongehalte (Ozonpartialdruck: in 20 bis 25 km Höhe: ca. 120 nbar, bis 5 km Höhe: ca. 30 nbar (Seinfeld und Pandis, 1998)) aufweisen.

Gleichzeitig findet nachts wegen fehlender Sonneneinstrahlung keine photochemische Ozonbildung statt, sondern es kommt zum einen über die Reaktion mit NO zum Abbau des Ozons, und zum anderen ist ein Rückgang auf Grund trockener Deposition an Erdoberfläche und Vegetation zu vermerken (Depositionsgeschwindigkeit im Fichtenbestand $0.4 \cdot 10^{-2} \text{ ms}^{-1}$ (Helbig et al., 1999)). Bis in die frühen Morgenstunden findet demnach bei Ausprägung einer starken nächtlichen stabilen Schichtung nahe der Erdoberfläche eine Abreicherung bzgl. des Ozons statt.

Mit Einsetzen der morgendlichen Turbulenz kurz nach Sonnenaufgang induziert durch die zunehmende Sonneneinstrahlung und die einhergehende Erwärmung der Erdoberfläche bricht diese stabile Schichtung zusammen und Einmischung mit Ozon angereicherter Luftmassen aus höheren troposphärischen Schichten lässt die Ozonkonzentration am Boden schnell ansteigen. Mit zunehmender Sonneneinstrahlung und Temperatur steigt zunächst die natürliche VOC-Produktion an (Olszyna et al., 1997) und die photochemische Ozonproduktion gewinnt zusehends an Einfluss und der Ozontagesgang erreicht im Laufe des Nachmittags seinen Höhepunkt.

Mit abnehmender Sonneneinstrahlung am späteren Nachmittag erlangen diejenigen Faktoren die für die Entfernung des Ozons aus der Luft verantwortlich sind zunehmende Bedeutung und überwiegen letztendlich. Dies führt zum erneuten Rückgang der Ozonkonzentration am Abend und in den folgenden Nachtstunden mit dem erneuten Erreichen des täglichen Konzentrationsminimums in den frühen Morgenstunden und der Kreislauf beginnt von neuem (Greenhut et al., 1995; Harrison et al., 1978; Hastie et al., 1993; Hastie et al., 1995 und Kelly et al., 1984). Abbildung 5.5 zeigt dazu repräsentativ die mittleren Tagesgänge der Ozonkonzentration der Monate Juli und November.

Einhergehend mit dem Jahresgang des Konzentrationsverlaufes mit den höchsten Werten in den Sommermonaten und den geringsten Werten in den Wintermonaten, zeigen sich folglich ebenso saisonal bedingte Unterschiede der Tagesdynamik sowohl in Konzentrationsniveau, als auch in täglicher Amplitude zwischen Minimal- und Maximalwert.

Um nun das monatspezifische Verhalten des Ozontagesganges zu bestimmen, wurden mittlere Tagesgänge der Ozonkonzentration der Tage mit mittlerer bis hoher Sonneneinstrahlung differenziert nach den einzelnen Monaten des Jahres auf Basis von über 12 Stunden tiefpassgefilterter Daten ermittelt.

Tage mit nur geringer Sonneneinstrahlung zeigen einen lediglich schwach ausgeprägten bzw. überhaupt keinen Tagesgang und wurden deshalb für diese Analyse ausgeschlossen. Verwendet wurden alle Tage mit Strahlungsmaxima über 100 W m^{-2} in den Wintermonaten Oktober bis März bzw. alle Tage mit Strahlungsmaxima über 300 W m^{-2} in den Sommermonaten April bis September. Für die Wintermonate wurden im Mittel je 160 Tage, für die Sommermonate im Mittel je 250 Tage zur Bestimmung der mittleren monatlichen Tagesgänge der Jahre zwischen 1994 und 2007 herangezogen.

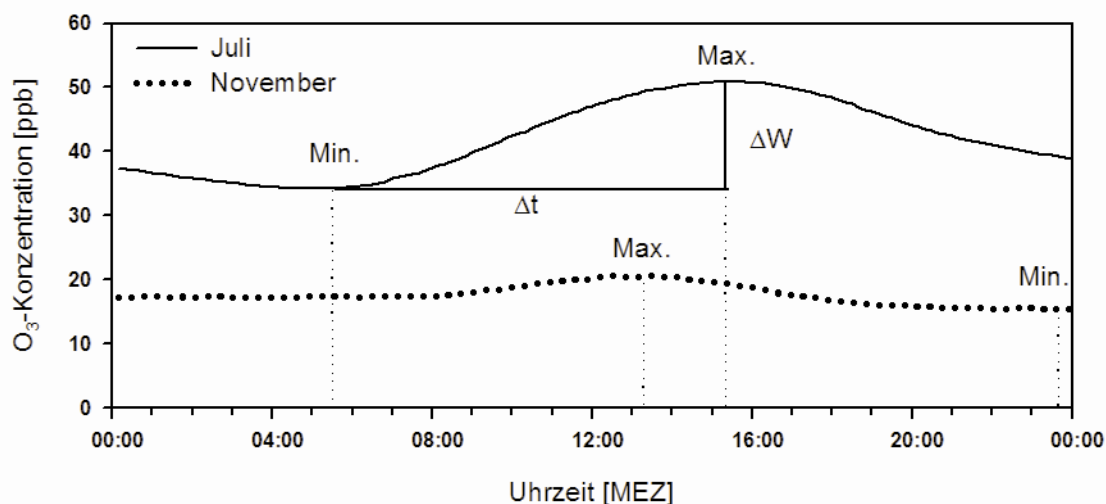


Abbildung 5.5: Mittlere Ozontagesgänge der Monate Juli und November in ppb und als über 12 Stunden tiefpassgefilterte Werte der Station Waldstein/Pflanzgarten zwischen 1994 und 2006. ΔW : mittlere Amplitude, Δt : mittlerer Zeitraum zwischen Auftreten des Minimums und des Maximums; die gestrichelten Linien markieren die Zeitpunkte des mittleren Auftretens der Minima und Maxima im Tagesverlauf.

Zur Charakterisierung der einzelnen Monate wurden Minima, Maxima und deren Eintrittstermine im Tagesverlauf und die Amplituden des Tagesganges eingesetzt. Zusätzlich wurde das Verhältnis zwischen mittlerer Amplitude und mittlerer zeitlicher Differenz zwischen Auftreten des Minimums und des Maximums im Tagesverlauf als charakterisierender Maßstab für die einzelnen Monate bestimmt. Im Folgenden wird dieses Verhältnis als ATI (Amplitude Time Index) bezeichnet. Alle Charakterisierungsgrößen sind für die einzelnen Monate in Tabelle 5.1 aufgeführt. Die größten Differenzen zwischen mittleren Minima und Maxima zeigten mit Abstand die Monate April bis September mit Amplituden über 15 ppb, wobei in den Monaten Juli und August die größten täglichen Schwankungen von beinahe 17 ppb bzw. 18 ppb zu beobachten waren. Die Monate März und Oktober zeigten Tagesamplituden um 8 ppb. In den Wintermonaten November bis Februar traten nur geringe mittlere Tagesamplituden von unter 5 ppb auf. Die geringsten Tagesschwankungen waren jedoch in den Monaten November und Dezember mit Amplituden um 1 ppb zu verzeichnen (Tabelle 5.1).

Zusätzlich neben Niveau und Amplitude zeigten auch die Termine des Auftretens der Minima und Maxima im Tagesverlauf charakteristische saisonale Unterschiede korrelierend mit der jahreszeitlichen Veränderung von Sonnenauf- bzw. Sonnenuntergang und Sonnenhöchststand nach der Zeitgleichung in Abhängigkeit der geographischen Lage des Standortes (Foken, 2006). In der Regel trat das Minimum im Tagesverlauf innerhalb der zweiten Nachthälfte zwischen 04:00 und 06:40 Uhr auf. Der früheste Eintritt fand in den Monaten April bis Juni zwischen 04:00 und 04:30 Uhr statt und war entsprechend der Sonnenaufgangstermine und der somit später einsetzenden morgendlichen Turbulenz in den Wintermonaten bis maximal 6:40 Uhr um beinahe drei Stunden im Februar in Richtung Tagesmitte verschoben. Auffällig ist, dass in den Monaten Januar, November und Dezember die absoluten mittleren Konzentrationsminima nicht erst in den frühen Morgenstunden wie im Falle aller anderen Monate auftraten, sondern bereits Ende der ersten Nachthälfte bzw. kurz nach Mitternacht zwischen 23:30 und 00:10 zu beobachten waren (Abbildung 5.5 und Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1: Vergleich der mittleren Tagesgänge der Ozonkonzentration zwischen 1994 und 2006 der Station Waldstein/Pflanzgarten der einzelnen Monate hinsichtlich ΔW : mittlere Amplitude, t_{Min} : mittlerer Zeitpunkt des Auftretens der Minima, t_{Max} : mittlerer Zeitpunkt des Auftretens der Maxima, Δt : mittlerer Zeitraum zwischen Auftreten der Minima und Maxima, mittleres Verhältnis von $\Delta W/\Delta t$: ATI (Amplitude Time Index).

	ΔW [ppb]	t_{Min} [MEZ]	t_{Max} [MEZ]	Δt [h:min]	$\Delta W/\Delta t$ [ppb min ⁻¹]
Januar	3.77	23:50	13:00	13:10	0.0048
Februar	4.76	6:40	14:50	8:10	0.0097
März	8.88	5:50	14:30	8:20	0.0171
April	15.75	4:10	15:00	10:50	0.0242
Mai	15.94	4:00	14:50	10:40	0.0249
Juni	15.70	4:30	15:10	10:40	0.0245
Juli	16.71	5:30	15:20	9:50	0.0283
August	17.96	4:50	15:20	10:30	0.0285
September	15.94	5:10	15:00	9:50	0.0270
Oktober	7.71	4:50	13:40	8:50	0.0145
November	0.90	23:30	13:40	14:10	0.0011
Dezember	1.06	0:10	13:00	12:50	0.0014

Das mittlere Ozonmaximum trat in den Nachmittagsstunden zwischen 13:00 und 15:30 ein. Tendenziell wurde in den Wintermonaten das Tagesmaximum bereits kurz nach Mittag ab 13:00 Uhr, wegen der sich frühzeitig am Nachmittag verringernden Sonneneinstrahlung, erreicht. In den Sommermonaten war auf Grund der deutlich längeren Tage und der zu späterem Zeitpunkt untergehenden Sonne das Maximum im Tagesverlauf erst gegen Mitte des Nachmittags ab etwa 15:00 (Tabelle 5.1) zu verzeichnen.

Das insgesamt, über alle Monate hinweg betrachtet, relativ früh im Tagesverlauf auftretenden Maximum ist ein Zeichen dafür, dass der Ozonverlauf am Standort Waldstein/Pflanzgarten in erster Linie durch primäre Ozonbildung geprägt ist.

Die wichtigste Quelle des Ozons stellt also wie erwartet die natürliche VOC-Produktion des umliegenden Fichtenforstes da. Das Auftreten des Maximums zu späterer Stunde (zwischen 17:00 und 18:00 Uhr) wäre ein deutlicher Hinweis auf beträchtlichen Einfluss sekundärer Ozonproduktion (Hastie et al., 1995), also der Advektion mit Ozon belasteter Luftmassen aus Regionen mit NO- oder VOC-Quellen natürlichen oder anthropogenen Ursprungs. In diesem Fall würde das lokal bedingte Maximum am Nachmittag durch Advektion von stark mit Ozon belasteter Luftmassen zu späterer Stunde überprägt werden.

Der ATI als Verhältnis der mittleren täglichen Konzentrationsamplitude und zeitlicher Differenz zwischen Tagesmaximum und Tagesminimum soll zunächst als vergleichender Maßstab für den mittleren Tagesgang zwischen den einzelnen Monaten eines Messstandortes dienen und könnte für zukünftige vergleichende Studien zwischen verschiedenen Messstationen eingesetzt werden. Der ATI nimmt Werte der Größenordnung 10^{-3} ppb min⁻¹ bis 10^{-2} ppb min⁻¹ an.

Die Sommermonate zeigen mit Werten größer 0.02 ppb min⁻¹ die insgesamt höchsten ATI-Werte. Die Monate Juli und August weisen mit Werten von 0.0283 ppb min⁻¹ und 0.0285 ppb min⁻¹ die höchsten ATI-Werte im Jahresverlauf auf. In den Wintermonaten sind die ATI-Werte um bis zu einer Größenordnung verringert. In den Monaten November und Dezember sind mit Abstand die geringsten Werte des ATI mit 0.0011 ppb min⁻¹ und 0.0014 ppb min⁻¹ zu verzeichnen. Die Monate Januar und Februar zeigen auf Grund der begünstigenden Witterungsbedingungen und der höheren Sonneneinstrahlung zur deutlicheren Ausprägung des Ozontagesganges bereits ATI-Werte von 0.0048 ppb min⁻¹ und 0.0097 ppb min⁻¹. Die Höhe des Unterschieds des ATI zwischen den Sommer- und Wintermonaten zeigt deutlich, dass die saisonale Schwankung der Tagesamplitude wesentlich stärker ausgeprägt ist, als die zeitliche Drift im Jahresverlauf des Auftretens der täglichen Minima und Maxima nach der Zeitgleichung für den Sonnenstand und die Sonnenaufgangs- bzw. Sonnenuntergangstermine in Abhängigkeit von der geographischen Lage der Messstation.

Um nun mögliche Entwicklungen der Tagesgangdynamik der erfassten Ozondaten seit 1994 aufzuspüren, wurden die mittleren Tagesgänge der einzelnen Monate zusätzlich nicht über alle Jahre hinweg (1994 bis 2007), sondern über ausgewählte gleichlange Zeitabschnitte gemittelt. Zusammengefasst wurden jeweils die gleichen Monate dreier aufeinander folgender Jahre (1995 bis 1997, 1998 bis 2000, 2000 bis 2003 und 2004 bis 2006). Zum Vergleich der Zeitabschnitte wurden erneut das jeweilige Konzentrationsniveau und die Amplituden der mittleren Tagesgänge betrachtet.

Die Entwicklung des Konzentrationsniveaus im Zuge der Jahre des mittleren Tagesverlaufes zeigte in allen Monaten mit Ausnahme des Monats März einen Rückgang des Ozonniveaus wie er auch schon bei Vergleich der Jahresgänge in Kapitel 5.1 und teilweise in der Trendauswertung in Jahresbericht 2008 ersichtlich wurde. Die ersten beiden Zeitabschnitte (1995 bis 1997 und 1998 bis 2000) wiesen in all diesen Monaten ein höheres Ozonniveau als die beiden letzten Zeitabschnitte (2001 bis 2003 und 2004 bis 2006) auf. Exemplarisch ist der Rückgang des Ozonkonzentrationsniveaus in Abbildung 5.6 am Beispiel des Monats August gezeigt.

Da für die Ermittlung der mittleren Tagesgänge ausschließlich Tage mit mittlerer bis hoher Sonneneinstrahlung herangezogen wurden, ist die über beinahe alle Monate zu verzeichnende Niveauabnahme nicht allein durch rückläufiges Verhalten der Sonneneinstrahlung zu erklären. Für den August ist eine stetige Abnahme der mittleren Tagesgänge der Globalstrahlung zu verzeichnen. Für alle anderen Monate ist diese Entwicklung jedoch nicht derart deutlich ausgeprägt. Speziell die Monate Januar, Februar und März zeigen sogar eine eindeutige Niveauanhebung. Für die allgemeine Verringerung der Ozonkonzentrationen müssen also noch andere Faktoren einen bedeutenden Einfluss ausüben, wie evtl. der Rückgang der NO_x -Konzentrationen (vgl. Jahresbericht 2008).

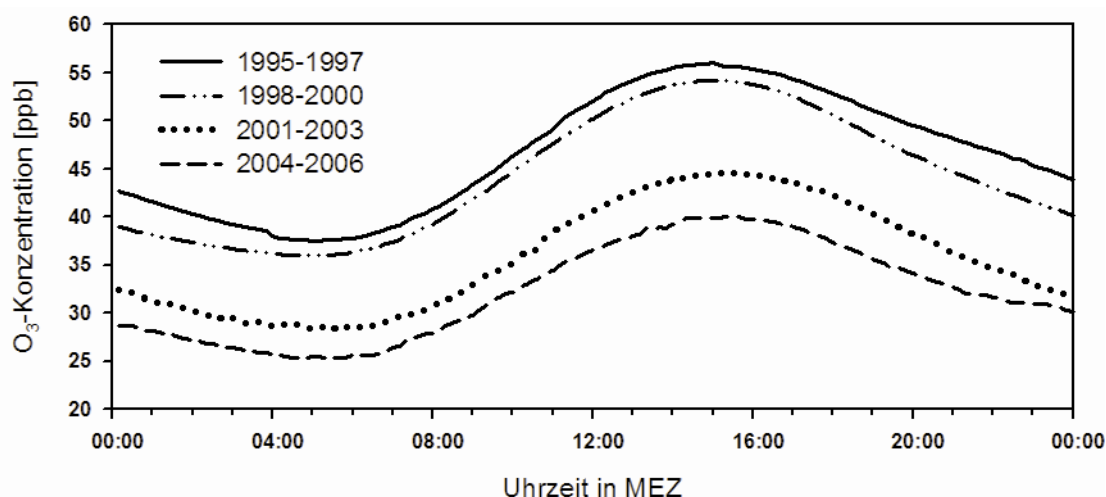


Abbildung 5.6: Entwicklung des Ozonkonzentrationsniveaus anhand mittlerer Ozontagesgänge des Monats August in ppb und als über 12 Stunden tiepassgefilterte Werte der Station Waldstein/Pflanzgarten zwischen 1995 und 2006. Gemittelt wurde jeweils über drei aufeinander folgende Jahre: 1995 bis 1997, 1998 bis 2000, 2000 bis 2003 und 2004 bis 2006.

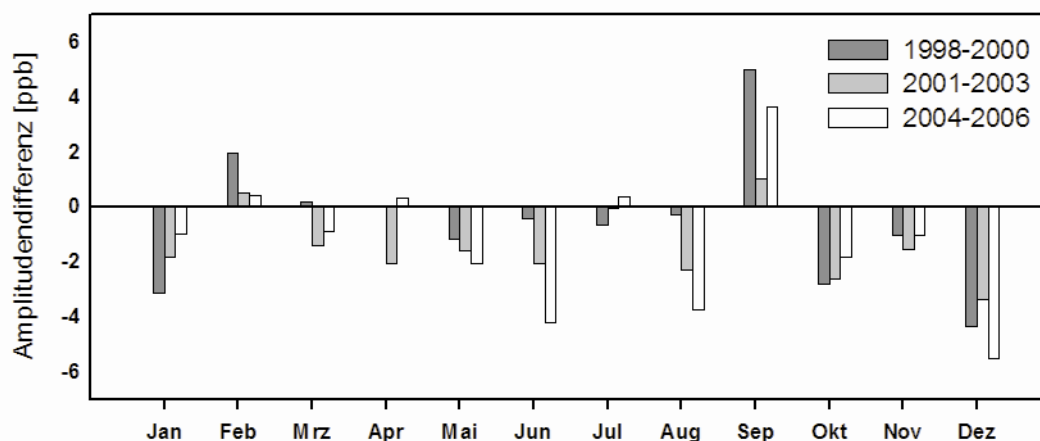


Abbildung 5.7: Entwicklung der Tagesgangamplituden der einzelnen Monate der Ozonkonzentration in ppb und als über 12 Stunden tiepassgefilterte Werte der Station Waldstein/Pflanzgarten zwischen 1998 und 2006. Gemittelt wurde jeweils über drei aufeinander folgende Jahre der jeweiligen Monate: 1995 bis 1997, 1998 bis 2000, 2000 bis 2003 und 2004 bis 2006. Als Bezugszeitraum gilt der erste Dreijahresabschnitt von 1995 bis 1997.

Zur Betrachtung der Entwicklung der Tagesamplituden bei Einteilung in die oben genannten Zeitabschnitte wurde der erste Dreijahresabschnitt von 1995 bis 1997 als Bezugsniveau gewählt und gleich Null gesetzt. Bei allen weiteren Dreijahresabschnitten wurden Differenzen zum Bezugsabschnitt bestimmt. Dabei ergaben sich folgende Entwicklungen der einzelnen Monate: Die Monate Februar, Mai, Juni, August, November und Dezember zeigten im Wesentlichen eine stetige Abnahme der mittleren Tagesamplituden zwischen dem ersten (1995 bis 1997) und dem letzten (2004 bis 2006) Dreijahres-Abschnitt von insgesamt ein bis fünf ppb. In den Monaten Januar, Juli, und Oktober zeichneten sich seit dem zweiten Dreijahresabschnitt (1998 bis 2000) geringfügige stetige Zunahmen von ein bis zwei ppb ab. Die restlichen Monate wiesen keine stetigen Veränderungen auf (Abbildung 5.7).

5.4 Auswertungen hinsichtlich besonderer meteorologischer Bedingungen

5.4.1 Einfluss von Stabilität

Um den Einfluss der Stabilität auf das Verhalten des Ozonverlaufes zu untersuchen wurden exemplarisch die über zwei Stunden tiefpassgefilterten Ozonverläufe der Sommermonate Juni, Juli und August der Jahre 2001, 2004 und 2006 nach dem Auftreten ausgeprägter atmosphärisch stabiler Bedingungen in den Nachtstunden sortiert. Als Auswahlkriterium wurden die Temperaturverläufe der Station Waldstein/ Pflanzgarten in 2 m Höhe ü. G. und der Turmspitze der Station Waldstein/Weidenbrunnen in 31 m Höhe ü. G. verwendet. Bei Einbeziehung der Stationshöhen liegt die Temperaturmessung an der Turmspitze der Station Waldstein/Weidenbrunnen 39 m über der Station Waldstein/Pflanzgarten. Als Nächte mit ausgeprägter stabiler atmosphärischer Schichtung im Untersuchungsgebiet wurden alle diejenigen ausgewählt, in denen nachts über mehrere Stunden die Temperatur an der Turmspitze in 31 m Höhe ü. G. gegenüber der Temperatur an der Station Waldstein/Pflanzgarten in 2 m ü. G. eindeutig erhöht war.

Aus den betrachteten Zeiträumen wurden insgesamt 165 Tage mit nächtlicher stabiler atmosphärischer Schichtung und 90 Tage an denen keine ausgeprägten stabilen Bedingungen in den Nachtstunden herrschten ausgewählt. Für alle ausgewählten Tage wurden die Minima und Maxima sowie die zugehörigen Tagesamplituden bestimmt und jeweils über ein Jahr gemittelt. Im Mittel lagen sowohl die Minima, als auch die Maxima an Tagen mit ausgeprägter nächtlicher stabiler atmosphärischer Schichtung über denjenigen der Tage, die keine ausgeprägte nächtliche atmosphärische Schichtung aufzuweisen hatten. Im Falle der Minima waren diese im Durchschnitt um 10 % bis 25 % höher. Bei den Maxima ergab sich eine mittlere Differenz von 15 % bis 25 %.

Bei den mittleren Tagesamplituden ergab sich ähnliches Bild. Die Amplituden der Tage ohne ausgeprägte nächtliche atmosphärische Stabilität im Untersuchungsgebiet betrugen lediglich zwischen 67 % und 78 % der Werte der Tagen an denen sich eine eindeutige nächtliche stabile Schichtung ausbildete und waren somit im Jahresdurchschnitt um bis zu 33 % vermindert. Abbildung 5.8 zeigt dazu an zwei Beispielen aus den Jahren 2001 und 2004 den

unterschiedlichen Verlauf der Ozonkonzentration in Abhängigkeit von Ausprägung nächtlicher Stabilität.

Prinzipiell kommt der Tagesgang der Ozonkonzentration durch die in Kapitel 5.3 beschriebenen Prozesse zustande. Dabei kommt der Ausbildung einer stark stabilen atmosphärischen Schichtung in den Nachtstunden eine ganz erhebliche Bedeutung zu. Nur unter stabilen Bedingungen wird der nächtliche Eintrag stark mit Ozon angereicherter Luftmassen aus höheren Troposphärenschichten, die durch stratosphärischen Eintrag erhöhte Ozonkonzentrationen aufweisen, verhindert. Photochemische Ozonbildung kann in den Nachtstunden ohne UV-Strahlung nicht stattfinden und somit ist der Ozonverlauf durch konzentrationsmindernde Prozesse gesteuert. Über NO findet Abbau des Ozons statt. Gleichzeitig erfolgt Entfernung des Ozons über trockene Deposition an Erdoberfläche und Vegetation aus der Luft (Greenhut et al., 1995; Harrison et al., 1978; Hastie et al., 1993; Hastie et al., 1995 und Kelly et al., 1984). Deshalb kommt es zur Ausprägung dieses typischen Tagesganges mit hohen Werten tagsüber und geringen Werten in der Nacht (Abbildung 5.8 A).

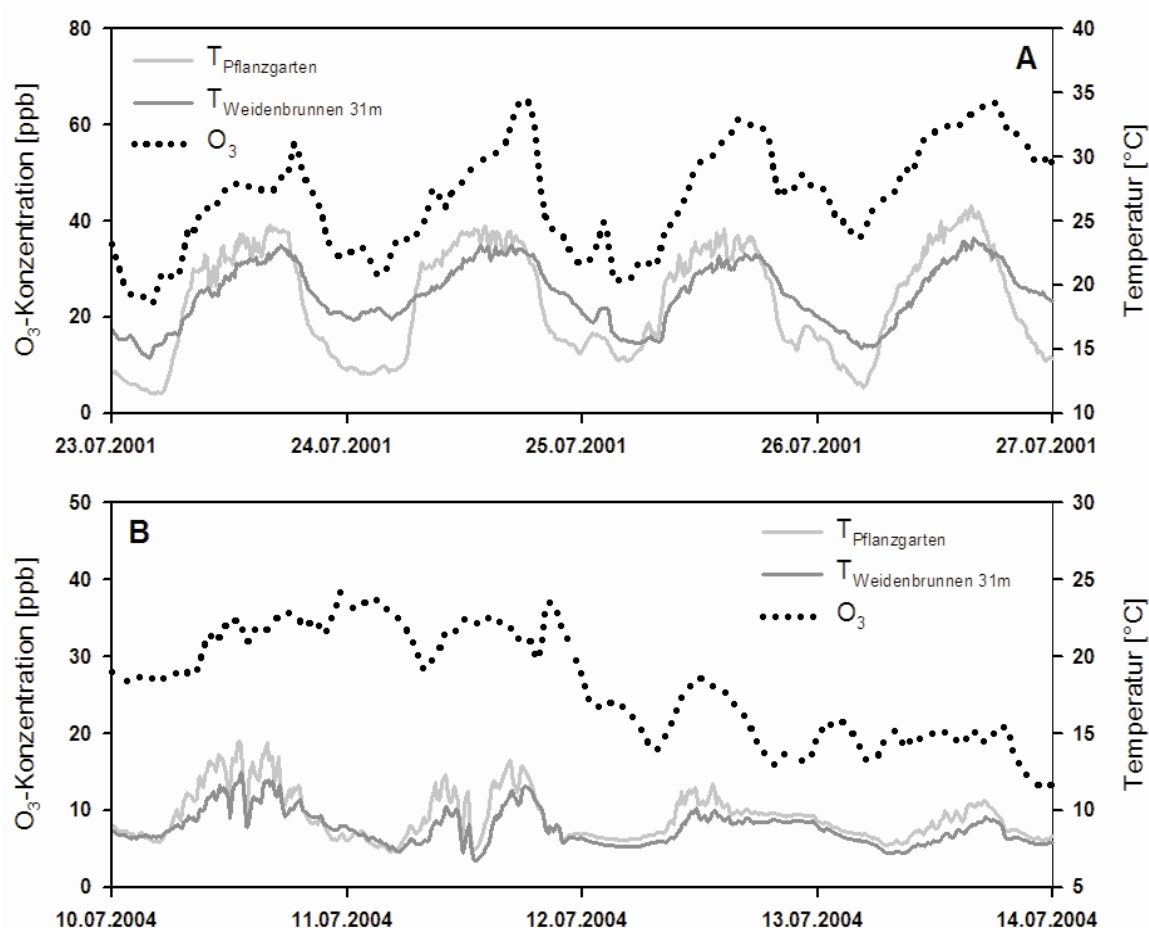


Abbildung 5.8: Vergleich des Verlaufes der Ozonkonzentration in ppb und als über zwei Stunden tiefpassgefilterte Werte der Station Waldstein/Pflanzgarten an Tagen mit (A) und ohne (B) ausgeprägter nächtlicher stabiler atmosphärischer Schichtung. Als Stabilitätskriterien sind die Temperaturverläufe der Stationen Waldstein/Pflanzgarten (767 m ü. NN) und Waldstein/ Weidenbrunnen in 31 m Höhe (806 m ü. NN) mit aufgenommen.

Bei fehlender nächtlicher Stabilität werden Luftmassen erhöhter Ozonkonzentration bis in Bodenähe eingemischt und es kommt somit zur ständigen Nachlieferung von Ozon und kein ausgeprägter nächtlicher Konzentrationsabfall durch Abbau und Deposition ist auf Grund der Kompensation durch den oben beschriebenen Prozess zu beobachten (Abbildung 5.8 B).

Prinzipiell würde man vielleicht eher erwarten, dass bei Fehlen einer starken nächtlichen stabilen Schichtung, auf Grund der nächtlichen Nachlieferung ozonreicher Luftmassen das Grundniveau der Ozonkonzentration insgesamt erhöht ist, und somit sowohl Minima als auch Maxima höher sind, als an Tagen mit nächtlicher Stabilität. Dies ist jedoch nicht der Fall. Um diesen scheinbaren Widerspruch zu klären, ist die Betrachtung der Zusammenhänge notwendig. Nächtlich stabile Schichtung tritt immer dann auf, wenn sich tagsüber durch starke Sonneneinstrahlung die Erdoberfläche erwärmt, und diese gespeicherte Wärme bei Beginn der Nacht durch Ausstrahlung wieder an die darüber liegende Luft abgegeben wird. Gleichzeitig sind jedoch auch die photochemische Ozonproduktion und die konvektive Durchmischung der Luft an diesen Tagen besonders hoch. Zusätzlich ist zu vermerken, dass an diesen Tagen in der Regel tagsüber eine bodennahe Windströmung aus NW an der Station Waldstein/Pflanzgarten herrschte, bei Einsetzen der Nacht jedoch eine Drehung der bodennahen Windrichtung auf SE zu beobachten war. Tage ohne ausgeprägte stabile nächtliche Schichtung wiesen meist vermindertes Strahlungsaufkommen und somit geringere Erwärmung der Erdoberfläche und geringe nächtliche Ausstrahlung auf und die photochemische Ozonbildung untertags war gleichzeitig vermindert. Jedoch kam es auch an Tagen ohne auffällig geringere Sonneneinstrahlung bei bodennahem Wind aus Richtung NW am Tag und in der Nacht, zu Situationen ohne starke nächtliche stabile Schichtung und zu keinem gut ausgebildeten Tagesgang des Ozonverlaufes.

5.4.2 Einfluss von Sonneneinstrahlung und Nebelereignissen

Um die Bedeutsamkeit von Nebelereignissen und den Einfluss der Sonneneinstrahlung auf den Verlauf der Ozonkonzentration herauszuarbeiten wurden wiederum über zwei Stunden tiefpassgefilterte Ozondaten verwendet. Herangezogen wurden erneut die Sommermonate Juni, Juli und August der Jahre 2001, 2004 und 2006. Um außerdem Unterschiede zwischen Sommer und Winter herauszustellen wurden die Monate November und Dezember, die am Waldstein die höchste Anzahl an Nebeltagen (mindestens ein 10-min Wert der Sichtweitenerfassung unterhalb 1000 m) im Jahr aufweisen (Foken, 2003), mit einbezogen. Um wirklich Effekte durch Nebelereignisse auf den Ozontagesgang feststellen zu können, ist es notwendig ausschließlich Tage mit sehr starkem Nebelaufkommen über mehrere Stunden für diese Analyse zu verwenden. Deshalb wurden als Nebeltage in diesem Fall alle Tage mit mindestens fünf Stunden im Tagesverlauf mit Sichtweiten unterhalb von 400 m definiert. Als Vergleichstage wurden diejenigen ausgewählt, an denen keine Nebelbildung stattfand, die Sichtweite (Waldstein/Weidenbrunnen in 21 m ü. G.) im gesamten Tagesverlauf über 2000 m lag und hohe Sonneneinstrahlung mit Spitzenwerten bei Sonnenhöchststand im Sommer von über 600 W m^{-2} und im Winter von über 100 W m^{-2} und außerdem nur wenige Einbrüche der Sonneneinstrahlung durch Bewölkung aufzuweisen hatten.

Zur Auswertung wurden erneut Minima, Maxima und die zugehörigen Amplituden der mittleren Tagesgänge der jeweiligen Ereignisse eingesetzt. Für die Sommermonate wurden nach obiger Definition insgesamt 40 Nebeltage und 102 Strahlungstage zur Analyse ausgewählt. Für die Wintermonate ergaben sich insgesamt 72 Nebeltage und 54 Strahlungstage. An Tagen mit hoher Sonneneinstrahlung bildete sich in Folge der in Kapitel 5.3 beschriebenen Prozesse sowohl im Winter, als auch im Sommer im Allgemeinen ein für den entsprechenden Monat typischer Tagesgang aus. Tage, an denen starke Nebelbildung stattfand, zeigten in erster Linie auf Grund des fehlenden Einflusses der Sonneneinstrahlung nicht diesen klassischen Verlauf über den Tag hinweg (Abbildung 5.9). Je nach Dauer und Zeitpunkt des Nebelereignisses zeigten sich Variationen im Ozontagesgang von geringer Verringerung der Tagesamplitude bis zu völligem Ausbleiben eines Tagesganges. Am Tage auftretende Nebelereignisse wirken sich stärker aus als nächtliche, die im Laufe der Morgen- und Vormittagsstunden durch zunehmende Sonneneinstrahlung aufgelöst wurden und die Sonneneinstrahlung hinsichtlich photochemischer Ozonbildung wirksam werden konnte.

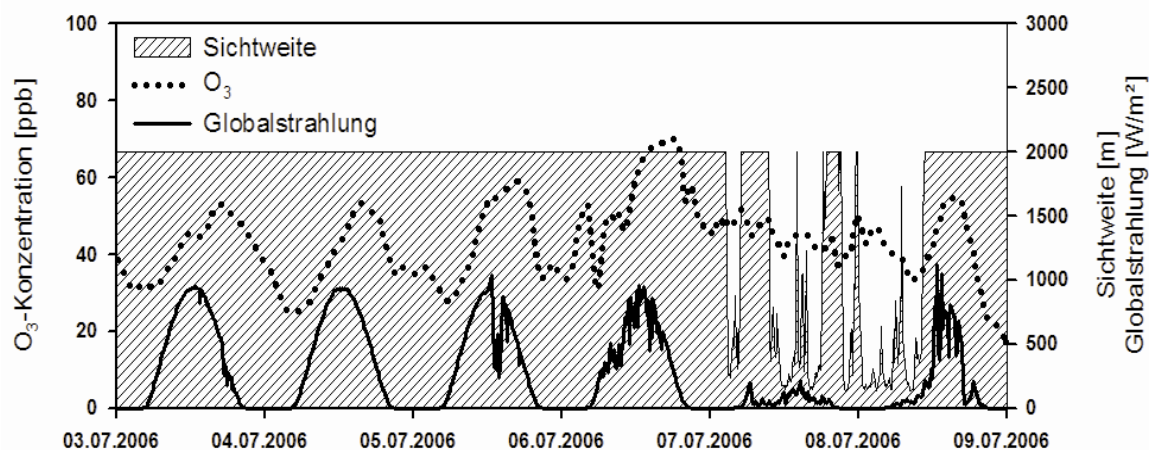


Abbildung 5.9: Verlauf der Ozonkonzentration in ppb und als über zwei Stunden tiefpassgefilterte Werte der Station Waldstein/Pflanzgarten an Tagen ohne Nebelbildung (03.07.2006 bis 06.07.2006) und an Tagen mit starker Nebelbildung (07.07.2006 bis 09.07.2006). Als Auswahlkriterien sind die Sichtweite und die Globalstrahlung der Station Waldstein/Weidenbrunnen mit aufgeführt.

Tabelle 5.2: Vergleich der mittleren Strahlungs- und Nebeltage in Sommer und Winter in ppb und als über zwei Stunden tiefpassgefilterte Werte der Station Waldstein/Pflanzgarten der Jahre 2001, 2004 und 2006 hinsichtlich Minima, Maxima und Tagesschwankung. Sommer: Juni, Juli und August; Winter: November und Dezember.

	Sommer		Winter	
	Strahlungstag	Nebeltag	Strahlungstag	Nebeltag
Minimum [ppb]	29	18	10	8
Maximum [ppb]	59	38	28	22
Amplitude [ppb]	30	20	18	14

Sowohl für Strahlungstage, als auch Nebeltage zeigten sich natürlich im Sommer insgesamt die höheren Werte hinsichtlich Minima, Maxima und Tagesamplitude als im Winter.

Bei Vergleich von Strahlungs- und Nebeltagen lagen alle drei Charakterisierungswerte bei Auftreten von starkem Nebel unter den Werten an Strahlungstagen (Tabelle 5.2). Im Winter betrugen die Minima, Maxima und Amplituden der Nebeltage im Mittel nur 75 %, 77 % und 78 % der Werte der Strahlungstage.

Im Sommer war die Konzentrationsminderung an Nebeltagen noch deutlicher entwickelt. Hier betrugen die Minima, Maxima und Amplituden der Nebeltage sogar nur 63 %, 65 % und 67 % der Werte der Strahlungstage. Die Minima wiesen also auf Grund des erhöhten Einflusses der Abbaureaktionen und der Ozonentfernung aus der Luft durch trockene Deposition an Nebeltagen nach obiger Definition jeweils die prozentual am stärksten ausgeprägte Verminderung auf.

Da bereits bei der Untersuchung des Einflusses der Stabilität auf den Verlauf der Ozonkonzentration unterschiedliches Verhalten bei verschiedenen bodennahen Anströmrichtungen an die Messstation zu erkennen war, ist auch im Zusammenhang mit Nebelereignissen die bodennahe Windrichtung mit in die Auswertung eingeflossen. Für die Nebeltage konnte jedoch keine Differenzierung nach verschiedenen Windrichtungen durchgeführt werden, da Tage mit sehr starkem Nebelaufkommen ausschließlich an Tagen mit bodennahen Windrichtungen aus NE zu verzeichnen waren. Für die Strahlungstage konnte jedoch eine Differenzierung nach drei verschiedenen Fällen der bodennahen Anströmungsrichtung durchgeführt werden. Die Einteilung erfolgte nach Winden aus NW, SE und unterschiedlichen Windrichtungen am Tage und in der Nacht. Dabei herrschte tagsüber bodennahe Anströmung aus NW gefolgt von anschließendem Richtungswechsel in den Abendstunden auf Anströmung aus SE im Verlaufe der Nacht.

Für die Sommermonate war diese Einteilung gut durchführbar, da ausreichend viele Tage vorhanden sind. In den Wintermonaten konnten bei dieser Einteilung nur wenige Tage mit ganztägiger Anströmung aus NW und mit Anströmung aus NW am Tage und aus SE in der Nacht gefunden werden. Im Sommer traten höchste Minima und Maxima und größte Tageschwankungen bei Anströmbedingungen am Tage aus NW und in der Nacht aus SE auf. Die geringsten Minima, Maxima und Tageschwankungen waren bei Windrichtungen aus NW zu verzeichnen (Tabelle 5.3).

Tabelle 5.3: Vergleich der nach bodennahen Windrichtungen eingeteilten mittleren Strahlungstage im Sommer (Juni, Juli und August) in ppb und als über zwei Stunden tiefpassgefilterte Werte der Station Waldstein/Pflanzgarten der Jahre 2001, 2004 und 2006 hinsichtlich Minima, Maxima und Tageschwankung.

		Sommer		
Bodennahe	Wind-	NW	SE	Tag: NW; Nacht: SE
richtung				
Minimum [ppb]		25	27	30
Maximum [ppb]		48	57	63
Amplitude [ppb]		22	31	32

Sie betrugen im Mittel 84 %, 76 % und 69 %. Die Minima, Maxima und Amplituden der Tage mit SE-Anströmung betrugen im Mittel 88 %, 92 % und 96 % der Tage mit Anströmung aus NW am Tage und SE in der Nacht. Dieses Ergebnis entspricht den Beobachtungen bei der Analyse des Einflusses der Stabilität und dem Auftreten von Nächten mit stark stabiler Schichtung am Ort der Messung.

5.4.3 Charakterisierung Episoden hoher Ozonkonzentration

Wie bereits in Kapitel 5.1 zu sehen, treten Episoden besonders starken Ozonaufkommens relativ regelmäßig zu bestimmten Terminen im Jahresverlauf auf. Diese sind gekoppelt an bestimmte meteorologische Voraussetzungen und somit an besondere Witterungsbedingungen am Standort selbst auf Grund kleinräumiger Zirkulationsvariationen und auch an für weite Teile Europas wetterbestimmende Zirkulationsmuster, wie den nach Hess und Brezowsky (Gerstengarbe et al., 1999) definierten Großwetterlagen. Um Aussagen hinsichtlich des Verhaltens des Ozonverlaufes unter möglichen veränderten Klimaverhältnissen in der Zukunft machen zu können, ist an dieser Stelle der Versuch der Charakterisierung der seit dem Jahr 1994 am Standort Waldstein/Pflanzgarten aufgetretenen und am stärksten ausgeprägten Phasen erhöhter Ozonkonzentration bezüglich ihrer Verlaufsstruktur und nach gleichzeitigem Verhalten meteorologischen Größen und Vorläufersubstanzen bzw. Reaktionspartnern aufgeführt.

Analysiert wurde zunächst hinsichtlich typischer Verlaufs-, Aufbaubau- und Abbruchmuster. Anschließend wurden die Episoden bezüglich Dauer und grundlegender charakterisierender Parameter wie Minima, Maxima und Amplitude der gesamten Episoden untersucht. Des Weiteren wurde die Entwicklung der Tagesminima, -maxima und -amplituden im Verlauf der Episoden betrachtet. Abschließend wurden steuernde und korrelierende meteorologische und luftchemische Größen und Bedingungen wie Strahlung, Anströmrichtung, Windgeschwindigkeit, Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchte, Großwetterlagen und NO_x -Advektion als Kriterien des Auftretens, der Unterbrechung und des Abbruches von Phasen stark erhöhter Ozonkonzentration untersucht. Bei Kenntnis des Zusammenspieles bzw. des parallelen Auftretens dieser Faktoren und deren zur Einflussnahme nötigen Intensität oder Dauer im Zuge stark erhöhter Ozonphasen ist es möglich abschätzende Aussagen zu treffen, unter welchen Bedingungen, welche Art der Ozonepisoden vermehrt auftreten, wie intensiv deren Ausprägungen sein könnten, und unter welchen Voraussetzungen ein Abbruch einer Episode zu erwarten ist. Wenn bekannt ist, welche Parameter, bei welcher Intensität und Dauer zu beträchtlicher Reduzierung des Ozons in Bodennähe führen, ist es ebenso möglich bei gleichzeitiger Kenntnis der veränderten künftigen klimatischen Bedingungen bzw. der veränderten Witterungsverläufe im Jahr im Voraus zu bestimmen zu welchen Terminen das Auftreten von Ozonepisoden am wahrscheinlichsten sein werden und zu welchen Terminen sie in der Regel eher nicht zu erwarten sein werden.

Durchgeführt wurde diese Charakterisierung anhand 32 ausgewählter Ozonepisoden mit insgesamt 392 Tagen der Jahre 1994 bis 2007. Die Auswahl der Episoden erfolgte nach der bereits in Kapitel 5.1 zur Bestimmung der absoluten Minima und Maxima im Jahresverlauf eingesetzten und über 21 Tage geglätteten (Tiefpassfilterung nach Gauß, Österle et al., 1999) Zeitreihe.

Ausgewertet wurden jeweils die bei Tiefpassfilterung über 21 Tage am stärksten ausgeprägten Episoden eines jeden Jahres. Dabei wurden bis zu vier Episoden pro Jahr im Zeitraum zwischen März und September ausgewählt. Alle Analysen wurden jedoch unter Verwendung von nur über 12 Stunden tiefpassgefilterter Ozondaten durchgeführt und alle Konzentrationsangaben in diesem Abschnitt beziehen sich auf diese Datenglättung. Eine Datenglättung über 12 Stunden wurde ausgewählt um zufällige Fluktuationen und Ausreißerwerte zu eliminieren, um die Entwicklung der Minima, Maxima und Amplituden der einzelnen Tage mit fortschreitender Episodendauer heraus arbeiten zu können und jedoch gleichzeitig einen relativ glatten Kurvenverlauf mit nur eindeutig entwickelten Tagesgänge zu erhalten.

Prinzipiell wird der Verlauf der Ozonkonzentration durch zahlreiche Einflussfaktoren bestimmt. Durch die verschiedensten Kombinationsmöglichkeiten entstehen die verschiedensten Variationsmuster. Jedoch Phasen, die besonders hohe Ozonkonzentrationen aufweisen, entstehen als Folge ganz bestimmter Bedingungen, die die stetige Akkumulation des Ozons über mehrere Tage bis zu wenigen Wochen ermöglichen. Gemeint sind also Episoden, in denen mehr oder ebenso viel Ozon im Tagesverlauf mehrerer aufeinander folgender Tage gebildet wird als abgebaut und deponiert wird. Aus diesem Grund sind bei besonders stark ausgeprägten Ozonepisoden immer wieder ähnliche Verlaufsmuster der zugehörigen meteorologischen Größen zu beobachten. Man kann jedoch keines falls automatisch davon ausgehen, dass bei charakteristischem parallelem Verlauf einer meteorologischen Messgröße eine tatsächliche Korrelation zwischen dem Verlauf dieser Größe und dem Verlauf der Ozonkonzentration besteht. Vielmehr kann der Verlauf dieser Größe wiederum durch den Verlauf einer anderen meteorologischen Größe bestimmt werden, wie dies z.B. bei Luftfeuchte und Lufttemperatur ist. Es deshalb zu bedenken, dass zwischen den im Folgenden betrachteten Verläufen der meteorologischen Parametern und den Verläufen der Ozonkonzentration der ausgewählten Episoden teilweise Scheinkorrelationen bestehen. Für die reine Charakterisierung der Ozonepisoden ist dies an dieser Stelle jedoch nicht von Belang.

Im Wesentlichen können die Episoden in drei typische Unterscheidungsmuster eingeteilt werden. Abbildung 5.10 zeigt dazu Beispiele der drei am häufigsten auftretenden Verlaufsmuster. Mehr als die Hälfte aller herangezogenen Episoden (18 Episoden mit insgesamt 203 Tagen) zeigten auf Grund höherer Ozonbildung als Abbau eine rampenartige Aufbaustruktur mit stetiger Erhöhung des Niveaus der Tagesminima und der Tagesmaxima mit fortschreitender Dauer der Episode und abruptem Abbruch mit Absenkung des Minimum- und Maximumniveaus um bis zu mehreren 10er ppb innerhalb eines Tages (Abbildung 5.10 A). In den folgenden Ausführungen wird dieser Episodenverlauf als Typ A bezeichnet. Die übrigen ausgewählten Episoden teilen sich gleichmäßig auf die beiden verbleibenden Musterverläufe auf. Sie zeigten entweder zu Beginn der Episode ebenfalls eine rampenartige Aufbaustruktur mit anschließender Verharrung auf nahezu konstantem Niveau (Tagesgang ausgenommen) über mehrere Tage hinweg bei in etwa gleich großer Bildung und Abbau von Ozon am Tage und in der Nacht (7 Episoden mit insgesamt 107 Tagen, Abbildung 5.10 B) oder das erhöhte Konzentrationslevel wurde zu Beginn der Episode durch stark verminderten nächtlichen Konzentrationsrückgang schlagartig erreicht und in den folgenden Tagen herrscht eine in etwa ausgeglichene Ozonbilanz die zu einer plateauartig aufgebauten Ozonepisode führte (7 Episoden mit insgesamt 82 Tagen, Abbildung 5.10 C). In den weiteren Ausführungen werden diese beiden Episodenverläufe als Typ B und Typ C bezeichnet.

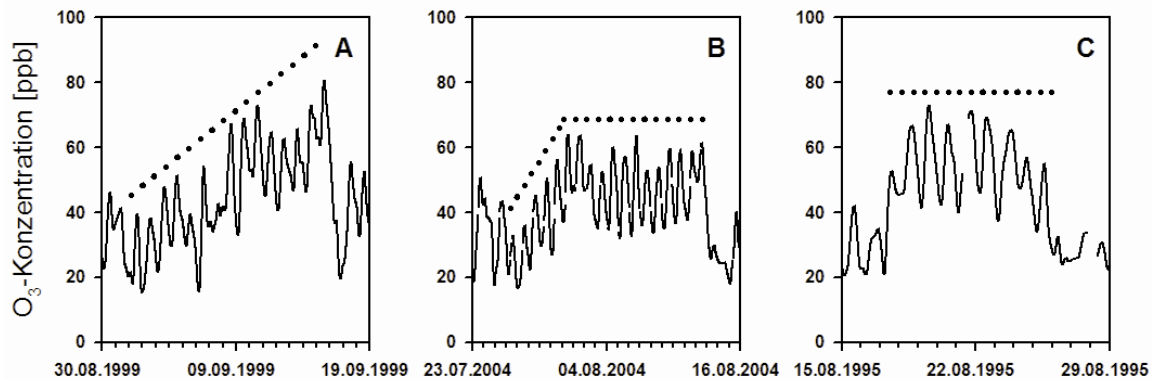


Abbildung 5.10: Beispiele der Klassifikation typischer Verlaufsmuster erhöhter Ozonepisoden in ppb und als über 12 Stunden tiefpassgefilterte Werte der Station Waldstein/Pflanzgarten.

A: Rampenstruktur (Typ A), B: Rampenstruktur und anschließende Plateaubildung (Typ B), C: Plateaubildung (Typ C); gepunktet: Schematisierte Episodenmuster.

Die 32 zur Untersuchung ausgewählten Episoden dauerten jeweils zwischen fünf und 19 Tagen, wobei sich lediglich drei Episoden über einen Zeitraum von weniger als acht Tagen erstreckten. Die Episoden der Typen A (Rampenstruktur) und der Typen C (Plateaustruktur) zeigten im Mittel einen über 11 bzw. 12 Tage andauernden Verlauf. Die Episoden vom Typ B (Rampe- und Plateaustruktur) erwiesen sich im Durchschnitt als die am längsten währenden mit einer mittleren Episodendauer von 15 Tagen. Der rampenartige Konzentrationsanstieg erfolgte hierbei im Mittel in sechs Tagen und die Plateaustruktur wurde im Mittel über acht Tage hinweg aufrechterhalten. Bei allen 32 Episoden wurden die Episodenabbruchstage mit in die Episodendauer eingerechnet, wobei der Abbruch einer Episode in der Regel an nur einem Tag erfolgte. Bei vereinzelter Ozonphasen war ein allmählicher Konzentrationsrückgang über bis zu drei Tagen zu beobachten.

Die Gesamtamplitude aller Ozonepisoden von Beginn der Ozonakkumulation bis zu den höchsten Tageswerten betrugen zwischen 15 ppb und 82 ppb, und wiesen somit eine durchaus weite Bandbreite auf. Im Mittel waren jedoch bei den rampenartigen Verlaufsmustern (Typ A) die größten Episodenamplituden mit 60 ppb zu beobachten. Die Verläufe, die nur eine Plateaubildung (Typ C) aufzuweisen hatten, zeigten die geringsten mittleren Episodenamplituden von 53 ppb. Die absoluten Minima der Verlaufsmuster bewegten sich zwischen 7 ppb und 30 ppb, wobei im Mittel bei Episoden des Typ B (14 ppb) die geringsten und bei Episoden des Typ C (19 ppb) die größten Werte zu verzeichnen waren. Bei Episoden des Typ C betrugen die absoluten Minima im Episodenverlauf im Mittel knapp 18 ppb. Die absoluten Maxima der Verlaufsmuster betrugen zwischen 37 ppb und 97 ppb. Die geringsten Werte traten im Mittel wiederum bei Episoden des Typ B und bei Episoden des Typ C mit ca. 72 ppb auf. Die höchsten mittleren Maxima zeigten Episoden des Typ A mit 78 ppb.

Bei Trendbestimmung der Veränderung der Minima und Maxima mit fortschreitender Episodendauer der Rampenstrukturen der Episodentypen A und B mittels linearer Regressionsrechnung zeigten sich sowohl für die Minima als auch für die Maxima bei beiden Episodentypen hoch signifikante positive Verläufe. Bemerkenswert dabei ist jedoch, dass bei beiden Episodentypen die linearen Regressionsfunktionen der Maxima bei allen bis auf zwei Ausnahmen höhere Steigungen zeigten als die Minima.

Für Typ A (Rampenstruktur) betrug die Steigung der Maxima bzw. Minima im Mittel 3.9 ppb bzw. 2.6 ppb pro Tag. Für Episoden des Typ B (Rampen- und Plateaustruktur) betrugen diese im Mittel 7.5 ppb (Maxima) und 7.1 ppb (Minima) pro Tag. Alle linearen Regressionsfunktionen und Signifikanzen nach Mann-Kendall dies bezüglich sind in Tabelle 9.8 und Tabelle 9.9 des Anhangs aufgeführt.

Demzufolge sollte auch bei den Tagesamplituden eine Zunahme im Verlauf der Episoden zu beobachten sein. Bei linearer Regressionsrechnung der Veränderung der Tagesamplituden im Episodenverlauf der Ozonphasen des Typ A war bei allen 18 Episoden ausnahmslos eine Zunahme mit fortschreitender Episodendauer zu verzeichnen. In 50 % der Episoden konnte eine Anpassung der Regressionsfunktion mit Signifikanz nach Mann-Kandall von größer als 80 % erfolgen. Bei den signifikanten Fällen kamen Zunahmen der Tagesamplitude zwischen 0.7 ppb und 3.8 ppb pro Tag vor ($S_i > 80 \%$). Im Mittel betrugen diese 1.8 ppb pro Tag. Alle Regressionsfunktionen und Signifikanzen nach Mann-Kendall der Amplitudenentwicklung im Episodenverlauf sind in Tabelle 9.10 des Anhangs aufgeführt.

Bei ca. 60 % der Episoden des Typ B war eine signifikante Erhöhung der Tagesamplitude während des rampenartigen Konzentrationsanstieges mit fortschreitender Episodendauer zu beobachten. Hierbei waren Amplitudenerhöhungen von 0.8 ppb bis 2.8 ppb pro Tag zu beobachten (Anhang Tabelle 9.11). Im Mittel betrugen diese 2.0 ppb pro Tag. Die Tagesamplituden der Episoden des Typ C zeigten wie zu erwarten war keinerlei signifikante Entwicklung mit fortschreitender Andauer der Episoden (Anhang Tabelle 9.12). In der zweiten Hälfte der Episoden des Typ B bei Ausbildung der Plateaustruktur waren ebenfalls keine signifikanten Entwicklungen mit fortschreitender Episodendauer zu erkennen (Anhang Tabelle 9.11).

Nach dieser einführenden Beschreibung der Ozonverläufe der ausgewählten Episoden folgt nun die ergänzende Analyse der zugehörigen Verläufe der meteorologischen Größen. Als Grundvoraussetzung für die Ausbildung der intensivsten Ozonepisoden im Jahr ist an allererster Stelle hohe Sonneneinstrahlung über mehrere aufeinander folgende Tage mit keinen oder nur geringen und wenigen Unterbrechungen zu nennen. Der Zeitraum um den 21. Juni wäre also prinzipiell auf Grund des höchsten Sonnenstandes und der längsten Tage im Jahr (Solstitium) dafür am besten geeignet. Bei passenden meteorologischen Bedingungen mit hoher Sonneneinstrahlung und geringer Wolkenbedeckung über mehrere Tage hinweg können die am stärksten ausgeprägten Ozonepisoden des Jahres jedoch auch bereits Ende März bzw. Anfang April oder auch erst Anfang September stattfinden.

Als Auslöser für die Entstehung ausgeprägter Ozonphasen nach Studium der Bodendruckkarten der entsprechenden Zeiträume (NCEP Reanalysis) waren zwei wiederkehrende Großwetterlagen basierend auf der Einteilung nach Hess und Brezowsky (Gerstengarbe et al., 1999). Zum einen herrscht in einigen Fällen der Ozonepisoden über einige Tage Ostlage (zonalen und gemischten Charakters) bei über Skandinavien und dem westlichen Nordrußland liegenden Hochdruckgebiet und Tiefdruckgebiet über Südeuropa und dem Mittelmeer, die warme und trockene kontinentale Luftmassen aus Osteuropa und Westrußland nach Mitteleuropa führte (Abbildung 5.11 A). Bedingt durch die beträchtliche Stabilität dieser Großwetterlage ist sie für die Ausprägung sommerlicher und hochsommerlicher Hitzeperioden in Mitteleuropa bekannt (Gerstengarbe et al., 1999; Wiedersich, 2003).

Zum anderen führte die teils über einige Tage stabile Lage eines Hochdruckgebietes über Mitteleuropa bei geringer Wolkenbildung zu länger andauernden strahlungsreichen Schönwetterphasen mit hohem Potential zur photochemischen Ozonbildung (Abbildung 5.11 B). Ein klassisches Beispiel dafür war in der Vergangenheit der regelmäßig auftretende Altweibersommer im September zu Beginn des Herbstes (Gerstengarbe et al., 1999; Wiedersich, 2003), wie er auch bei der in die Auswertung mit einbezogenen Episode zwischen dem 11.09. 2003 und dem 24.09.2003 eingetreten ist. Im Verlauf dieses 13 Tage andauernden Ereignisses waren nach der objektiven Wetterlagenklassifikation (Bissolli und Dittmann, 2001; Dittmann et al., 1995) sieben Tage sowohl hinsichtlich des 950 hPa- als auch des 500 hPa-Niveaus als antizyklonal ausgewiesen. Weitere fünf Tage waren zumindest auf einer der beiden Druckniveaus als antizyklonal vermerkt. Lediglich der erste Tag dieser Episode war mit zyklonalem Verhalten auf beiden Druckhöhen ausgewiesen.

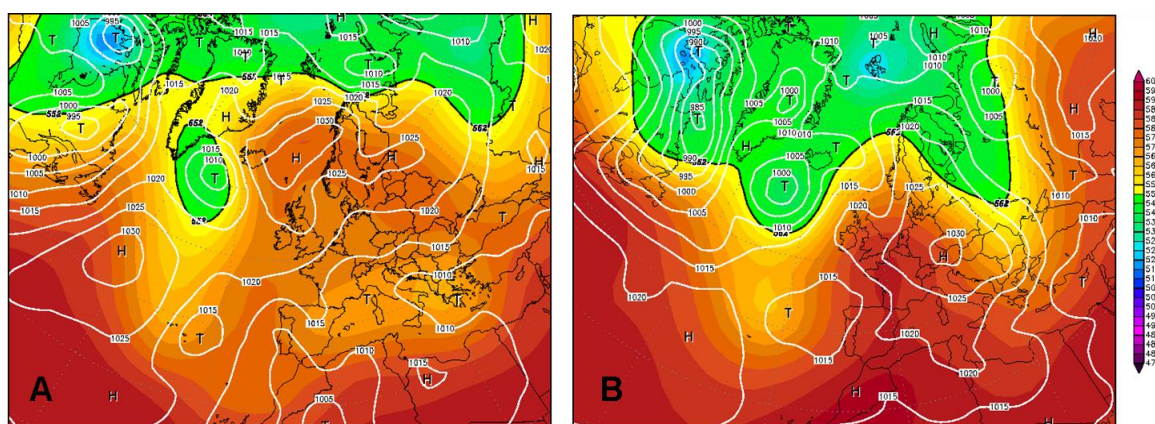


Abbildung 5.11: Bevorzugte Großwetterlagen zur Ausbildung von Ozonepisoden. A: Ostlage mit Hoch über Skandinavien und Tief über dem Mittelmeer am 06.06.2007. B: Hoch über Zentraleuropa am 18.06.2000. 500 hPa Geopotential in gpm und Bodendruck in hPa (NCEP Reanalysis).

Im Durchschnitt traten jedoch die Phasen mit den höchsten Ozonkonzentrationen bei sehr intensiv ausgebildeten Erstfrühlingsepisoden um den 28. April oder bei stark entwickelten Hochsommerepisoden mit Entwicklung der klassischen hochsommerlichen Hitzewellen um den 06. August (Hundstage) auf (vgl. Kap. 5.2). Die bereits angesprochenen Episoden im September im Zuge des Altweibersommers waren, wenn auch im Einzelfall von beträchtlichem Ausmaß mit Spitzenwerten von über 80 ppb, in aller Regel nicht die höchsten Episoden des Jahres. Diese beschränkten sich in den meisten Fällen auf Frühling, Früh- und Hochsommer. Die meisten der herangezogenen Episoden fanden im August (neun Episoden) und im April (sechs Episoden) statt. Die Monate Mai, Juni und Juli hatten jeweils fünf Episoden aufzuweisen und nur zwei Episoden aus den Septembermonaten des herangezogenen Zeitraumes gingen in die Episodencharakterisierung mit ein.

Bei Einteilung nach der objektiven Wetterlagenklassifikation für Deutschland (Bissolli und Dittmann, 2001; Dittmann et al., 1995) in 40 Wetterlagenklassen hinsichtlich großräumiger Anströmrichtung auf Höhe des 700 hPa-Niveaus, Zyklonalität auf Höhe des 950 hPa- und des 500 hPa-Niveaus und des Feuchtegehaltes der Troposphäre traten die in Tabelle 5.4, Tabelle 5.5 und Tabelle 5.6 aufgeführten prozentualen Verteilungen der Episodentage der Ozonphasentypen auf.

Bei allen drei Episodentypen herrschte an den meisten Tagen eine großräumige Anströmung aus Südwest. Die warme und trockene kontinentale Luftmassen bringenden Ostlagen waren insgesamt mit 4 % bis 13 % entgegen der Erwartung nur relativ gering vertreten und stellten bei Episoden des Typ C noch den größten Anteil mit bis zu 13 % der Tage. Auch wenn der prozentuale Anteil der Tage mit objektiv klassifizierter Ostlage nicht heraus stach, ist zu bemerken, dass insgesamt 10 der 32 untersuchten Episoden großräumige Anströmrichtungen aus Nordost bis Südost zwischen drei und acht nahezu zusammenhängenden Tagen aufwiesen. Die beiden oben genannten Großwetterlagen haben durchaus entscheidend zur Episodenausprägung beigetragen, auch wenn sie prozentual einen eher geringen Anteil an den gesamten Episodentagen einnahmen.

Tabelle 5.4: Verteilung der großräumigen Anströmrichtung auf Höhe des 700 hPa-Niveaus in % der Episodentage nach der objektiven Wetterlagenklassifikation der ausgewählten Ozonepisoden zwischen 1994 und 2007 der Station Waldstein/Pflanzgarten. NE: Nordost, SE: Südost, SW: Südwest, NW: Nordwest, k. d. A.: keine dominierende Anströmrichtung.

Anströmrichtung	Typ A: Tage [%]	Typ B: Tage [%]	Typ C: Tage [%]
NE	8	4	11
SE	7	11	13
SW	30	28	38
NW	30	23	18
k. d. A.	25	34	20

Tabelle 5.5: Verteilung der Zyklonalität auf Höhe des 950 hPa- und 500 hPa-Niveaus in % der Episodentage nach der objektiven Wetterlagenklassifikation der ausgewählten Ozonepisoden zwischen 1994 und 2007 der Station Waldstein/Pflanzgarten. A: antizyklonal, Z: zyklonal.

Zyklonalität	Typ A: Tage [%]	Typ B: Tage [%]	Typ C: Tage [%]
AA	59	42	39
AZ	20	19	18
ZA	13	21	20
ZZ	8	18	23

Tabelle 5.6: Verteilung der Feuchtegehalte der Troposphäre in % der Episodentage nach der objektiven Wetterlagenklassifikation der ausgewählten Ozonepisoden zwischen 1994 und 2007 der Station Waldstein/Pflanzgarten.

Feuchte	Typ A: Tage [%]	Typ B: Tage [%]	Typ C: Tage [%]
feucht	45	70	51
trocken	55	30	49

Zu bedenken ist hierbei zusätzlich, dass sowohl die Starttage, als auch die Abbruchtage der Episoden mit in die Gesamtanzahl der Episodentage mit eingerechnet wurden. Die Phasen mit Anströmung aus östlichen Richtungen wurden lediglich vereinzelt durch Tage, die sich durch keine dominierende Anströmrichtung auszeichneten und als undefiniert ausgewiesen waren unterbrochen. An 20 % bis 34 % der Tage der einzelnen Episodenmuster herrschte keine dominierende Anströmrichtung.

Die Verteilung der Episodentage der verschiedenen Episodenmuster hinsichtlich Zyklonalität wiesen zwischen 39 % und 59 % rein antizyklonalen Charakter auf. Nur 8 % bis 23 % der Tage waren rein zyklonal geprägt. Diese waren einerseits die ersten Tage am Beginn der Episoden, die evtl. durch noch erhebliche Bewölkung und Niederschlag auf Grund des sich noch im Gang befindlichen Wetterumschwunges und noch geringe Ozonwerte aufzuweisen hatten. Andererseits sind dies die Tage, die durch Konzentrationseinbrüche innerhalb der Episoden gekennzeichnet waren und Tage an denen der Abbruch der Episoden unter zum Teil erheblichem Konzentrationsrückgang erfolgte. Lediglich zwischen 30 % und 55 % der Tage waren nach der objektiven Wetterlagenklassifikation bzgl. der Feuchtigkeit der Troposphäre als trocken eingestuft.

Nach der Einordnung der Episodentage hinsichtlich großräumiger meteorologischer Bedingungen stellte sich nun die Frage nach dem Verhalten der meteorologischen Parameter, die direkt an der Messstation erfasst wurden, und die dann mitunter unmittelbar mit zur Ausbildung der Ozonphasen führten. Um dies zu betrachten, wurden zunächst Kreuzkorrelationen mittels Rangkorrelation nach Spearman (Österle et al., 1999) der gesamten Zeitreihen und mittlere Koeffizienten der ausgewählten Episoden zwischen Ozon und Globalstrahlung, Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, NO_2 und NO bestimmt. Bei Betrachtung der Kreuzkorrelation über die gesamte Zeitreihe hinweg mit Globalstrahlung und Niederschlag ergaben sich jeweils die größten Rangkorrelationskoeffizienten bei zeitlicher Verschiebung der Ozonreihe um 2.5 Stunden. Bei allen anderen Parametern waren die größten Rangkorrelationskoeffizienten ohne Phasenverschiebung zu verzeichnen. Die insgesamt größten positiven Kreuzkoeffizienten ergaben sich dabei mit der Lufttemperatur ($R = 0.55$) und mit der Globalstrahlung ($R = 0.39$). Die größten negativen Korrelationen zeigten sich bei relativer Luftfeuchte ($R = -0.64$) und der NO_2 -Konzentration ($R = -0.45$). Keine Korrelation über die gesamte Zeitreihe hinweg nach dem Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zeigte sich bei der Bestimmung mit Niederschlag, Windgeschwindigkeit und NO-Konzentration (Tabelle 5.7). Bei Betrachtung der Kreuzkorrelationen der ausgewählten Ozonepisoden wurde für jede Episode und für jeden Parameter ein Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman ermittelt und anschließend ein mittlerer Koeffizient für alle Episoden bestimmt. Für die Korrelation mit Globalstrahlung, Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte waren die höchsten Korrelationskoeffizienten bei zeitlicher Verzögerung des Ozonverlaufes um 3.2, 0.7 und 0.4 Stunden zu verzeichnen. Bei allen anderen Parametern traten die höchsten Korrelationen ohne Phasenverschiebung auf oder es zeigte sich keine einheitliche Phasenverschiebung. Bei dieser Betrachtung zeigte sich ebenfalls die höchste Korrelation bzw. Antikorrelation der Ozonkonzentration mit der Globalstrahlung ($R = 0.52$), der Lufttemperatur ($R = 0.80$) und der relativen Luftfeuchte ($R = -0.75$).

Gegenüber der Kreuzkorrelation bei Einbeziehung der gesamten Datenreihe waren bei Betrachtung dieser drei Größen nur im Zeitraum der 32 ausgewählten Episoden deutlich bessere Kreuzkorrelationen zu sehen, da im Verlauf der Episoden in erster Linie Schönwetterperioden, die in immer ähnlicher Weise wiederkehrende Ozonverläufe verursachen, und mit insgesamt sehr hohen Ozonkonzentrationen, mit prozentual wesentlich geringeren zufälligen Schwankungen auftreten und demzufolge in geringerem Maße die Berechnung des Korrelationskoeffizienten beeinflussen. Mit allen anderen betrachteten Größen zeigten sich wie bei diesbezüglicher Analyse über den gesamten Datensatz hinweg keine signifikanten Korrelationen. Für NO_2 und NO ergaben sich zumindest ebenfalls negative Koeffizienten. Der Rangkorrelationskoeffizient für NO_2 ($R = -0.22$) fällt noch geringer aus, da nur Episoden in den Sommermonaten in die Auswertung eingingen und somit hohe Antikorrelationen der Wintermonaten hier keinen Einfluss ausüben konnten.

Tabelle 5.7: Rangkorrelationskoeffizienten R nach Spearman der Kreuzkorrelationsrechnung von Ozon mit den aufgeführten Parametern der gesamten ungeglätteten Zeitreihen zwischen 1994 und 2007 der Station Waldstein/Pflanzgarten (positive Phasenverschiebung: Verlauf der Ozonkonzentration ist zeitlich verzögert).

Kreuzkorrelation mit Ozon	R	Phasenverschiebung [h]
Globalstrahlung	0.39	2.5
Lufttemperatur	0.55	0
Relative Luftfeuchte	-0.64	0
Niederschlag	0.01	2.5
Windgeschwindigkeit	0.02	0
NO_2 -Konzentration	-0.45	0
NO-Konzentration	-0.18	0

Tabelle 5.8: Mittlere Rangkorrelationskoeffizienten R nach Spearman der Kreuzkorrelationsrechnung von Ozon mit den aufgeführten Parametern aller ausgewählten Episoden mit erhöhten Ozonwerten bei ungeglätteter Zeitreihe der Station Waldstein/Pflanzgarten (positive Phasenverschiebung: Verlauf der Ozonkonzentration ist zeitlich verzögert).

Kreuzkorrelation mit Ozon	R	Phasenverschiebung [h]
Globalstrahlung	0.52	3.2
Lufttemperatur	0.80	0.7
Relative Luftfeuchte	-0.75	0.4
Niederschlag	-0.11	0
Windgeschwindigkeit	0.15	0
NO_2 -Konzentration	-0.22	0
NO-Konzentration	-0.19	0

Auf Grund der photochemischen Bildungsreaktionen des Ozons muss zunächst einmal die Bedingung hoher Sonneneinstrahlung über mehrere Tage hinweg gegeben sein.

Bei Bestimmung der Kreuzkorrelation nur für die ausgewählten Episoden ergab sich zwischen den Verläufen Globalstrahlung und der Ozonkonzentration mittels Rangkorrelation nach Spearman ein mittlerer Rangkorrelationskoeffizient R für alle Episoden von 0.52 bei mittlerer Phasenverschiebung um 3.2 Stunden. Bei keiner der Episoden lag die höchste Sonneneinstrahlung bei Sonnenhöchststand in den Mittagsstunden länger als einen Tag unter 600 W m^{-2} . Auch bei Episoden im September. Bei den Episoden der Monate März und April waren die Spitzenstrahlungswerte in den Mittagsstunden zwischen 750 W m^{-2} und 900 W m^{-2} . Im Mai, Juni, Juli und August waren Strahlungsspitzen von mindestens 800 W m^{-2} zu beobachten um die intensivsten Ozonepisoden auszubilden und Werte von bis zu 1100 W m^{-2} sind keinesfalls unüblich. Bei Episoden des Typ A und des Typ B war es sowohl möglich, dass sich die Ozonkonzentration bei Entwicklung einer Rampenstruktur mit gleichzeitigem Anstieg der Globalstrahlung von Tag zu Tag erhöht, oder aber die Globalstrahlung von sehr geringen Werten unter 300 W m^{-2} an einem Tag bis auf über 900 W m^{-2} am nächsten Tag anstieg und in den Folgetagen sich auf konstantem Niveau bewegte. Bei Untersuchung der Steigung der Ozonrampenstruktur konnte hinsichtlich dieses unterschiedlichen Verlaufes der Globalstrahlung zu Beginn der Episoden kein signifikanter Unterschied festgestellt werden (Beispiel: Abbildung 5.12).

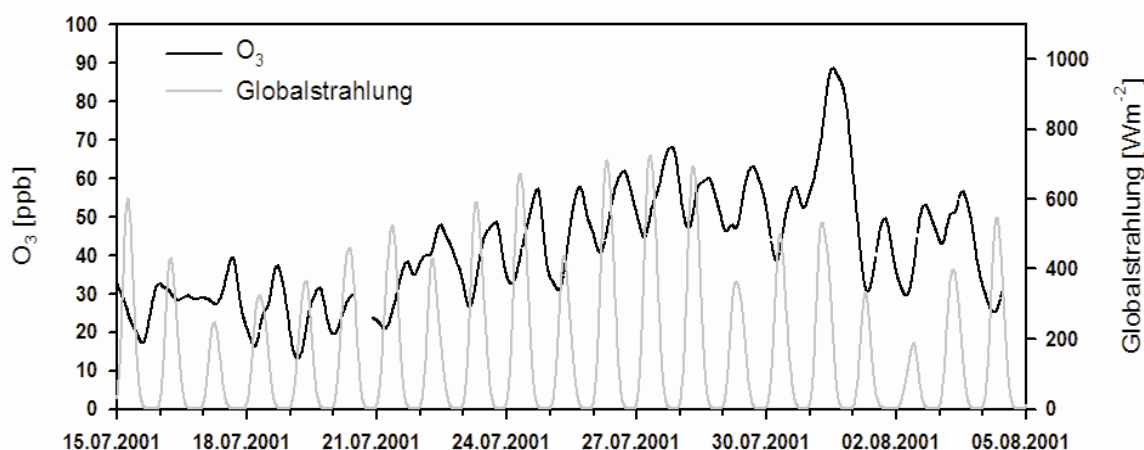


Abbildung 5.12: Ozonkonzentration in ppb und Globalstrahlung in Wm^{-2} bei über 12 Stunden geglätteten Werten der Station Waldstein/Pflanzgarten zwischen dem 15.07.2001 und dem 05.08.2001.

Zur Unterscheidung hinsichtlich Bevor- oder Benachteiligung eines Episodentyps bzgl. der Globalstrahlung wurden die 80 %- und 90 %-Perzentile und die Maxima der Globalstrahlung aller Episodentage ermittelt. Dabei gibt das 80 %-Perzentil die Höhe der Sonneneinstrahlung an, die in 4.8 Stunden pro Tag überschritten wurde. Das 90 %-Perzentil gibt die Höhe der Sonneneinstrahlung an, die in 2.4 Stunden pro Tag meist um den Sonnenhöchststand überschritten wurde. Für alle drei Charakterisierungswerte zeigten sich bei Mittelung über jeweils alle Episoden eines Typs für Episoden des Typ A die geringsten, für Typ B die höchsten und für Typ C die mittleren Werte (Tabelle 5.9).

Tabelle 5.9: Mittlere 80 %- und 90 %-Perzentile und Maxima aller Episoden unterschieden nach Typ A: Rampenstruktur, Typ B: Rampenstruktur mit anschließender Plateaubildung und Typ C: Plateau der Globalstrahlung der Station Waldstein/Pflanzgarten.

Episodentyp	$P_{80} [Wm^{-2}]$	$P_{90} [Wm^{-2}]$	Maximum $[Wm^{-2}]$
A	441	570	769
B	481	624	810
C	480	615	778

Da bei Episoden des Typ A häufig die Strahlung erst nach einigen Tagen ihre maximalen Werte erreichte, jedoch auch die Starttage mit geringerem Strahlungsaufkommen mit eingerechnet wurden, ergaben sich hierbei im Mittel die geringsten Werte. Bei Episoden des Typ B tritt dieser Effekt nicht auf, da die Episoden dieses Typs sich als insgesamt die längsten erwiesen, und somit durch große Anzahl der Tage mit hohen Strahlungswerten die Starttage keinen so großen Einfluss ausüben. Eigentlich wäre nach dieser Überlegung anzunehmen, dass bei Episoden des Typ C die höchsten Charakterisierungswerte der Globalstrahlung auftreten. Da jedoch dies die Episoden waren, die insgesamt die am wenigsten stark ausgeprägten waren und die die geringsten Tagesamplituden im Ozonverlauf zeigten, ist es verständlich, dass sie eben nicht die höchsten Werte der Strahlungscharakterisierung aufwiesen.

Gleichzeitig mit dem Anstieg der Globalstrahlung während des Episodenverlaufes ging eine stetige Erhöhung des Tagesganges der Lufttemperatur einher. Die Struktur der Lufttemperaturverläufe zeigte weit gehende Kongruenz zu den Ozonverläufen (Abbildung 5.13). Im Mittel erhöhte sich das Tagesmaximum der Lufttemperatur von Beginn bis Ende einer Ozonepisode um 12 °C; das Tagesminimum erhöhte sich im Mittel um 7.8 °C. Die größten Temperatursteigerungen der Tagesmaxima waren bei Episoden des Typ A mit 13.9 °C (7 °C bis 23.5 °C) im Mittel zu beobachten. Episoden des Typ B und des Typ C zeigten mittlere Temperaturerhöhungen von 9.5 °C (5.8 °C bis 14.8 °C) und 9.7 °C (2.6 °C bis 19.9 °C). Die absoluten Temperaturmaxima im Episodenverlauf beliefen sich bei allen drei Episodentypen auf ähnlichem Niveau zwischen 15.5 °C und 34.1 °C und betrugen im Mittel 25.8 °C. Im Falle der Temperaturminima im Tagesverlauf waren die höchsten Zunahmen im Episodenverlauf ebenfalls bei Episoden des Typ A von 9.1 °C (3.4 °C bis 16.7 °C) zu verzeichnen. Episoden des Typ B und des Typ C zeigten im Mittel Erhöhungen von 6.4 °C (3.4 °C bis 10.2 °C) und 5.8 °C (2 °C bis 8.3 °C) der Tagesminima. Die absoluten Temperaturminima lagen zwischen 7.3 °C und 10.3 °C und betrugen im Durchschnitt 5.2 °C (Beispiel: Abbildung 5.13).

Zusätzlich zur Lufttemperatur in 2 m Höhe der Station Waldstein/Pflanzgarten konnte durch Betrachtung der Lufttemperatur in 31 m der Station Waldstein/Weidenbrunnen eine Betrachtung der Episodentage hinsichtlich nächtlicher Stabilität erfolgen. Herangezogen werden konnten dazu auf Grund der Datenlage nur acht Episoden mit insgesamt 109 Episodentagen der Jahre 2001 bis 2006. Zu bemerken ist dabei, dass die klassischen Episodentage im Regelfall stark stabile atmosphärische Schichtung in den Nachtstunden aufzuweisen hatten. Im Mittel ergaben sich dabei maximale Temperaturunterschiede von 4.3 °C. Tage zu Episodenbeginn und Tage gegen Ende bzw. reine Episodenabbruchtage zeigten weniger stark ausgeprägte nächtliche atmosphärische Stabilität.

Im Mittel betrugen die maximalen nächtlichen Temperaturdifferenzen an Tagen zu Episodenbeginn zwischen den Stationen Waldstein/Pflanzgarten in 2 m Höhe und der Station Waldstein/Weidenbrunnen in 31 m Höhe nur ca. 50 % der Temperaturdifferenz der klassischen Episodentage, die eine Zunahme der Ozonwerte oder einen Verlauf auf ähnlich hohem Niveau wie am vorangehenden Tag und keinen Konzentrationseinbruch aufzuweisen hatten, mit im Mittel 2.2 °C. Bei Episodenabbruchtagen war ebenfalls nur eine mittlere maximale Temperaturdifferenz in den Nachtstunden von lediglich höchstens zu 2.1 °C zu verzeichnen (Beispiel: Abbildung 5.14).

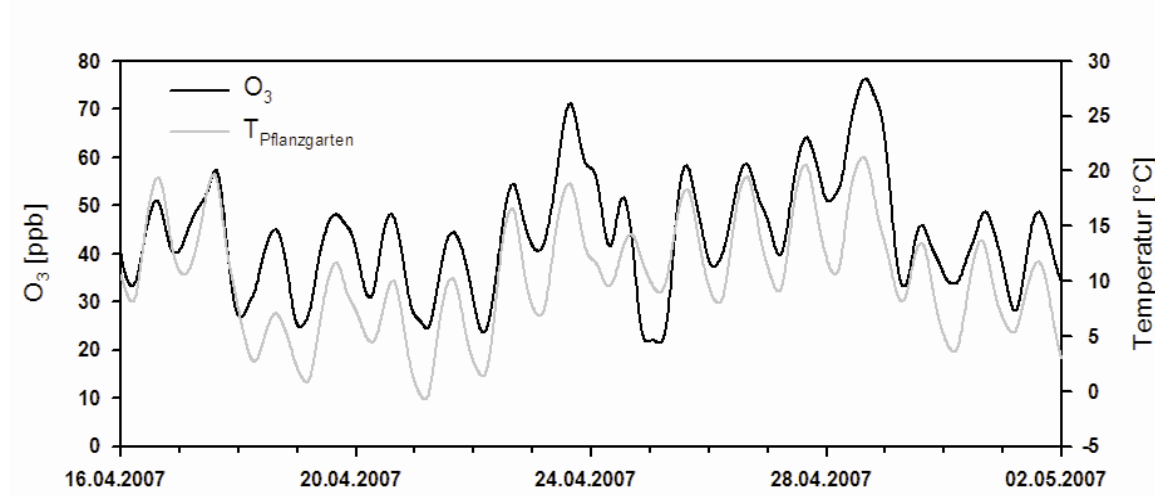


Abbildung 5.13: Ozonkonzentration in ppb und Lufttemperatur in °C bei über 12 Stunden geglätteten Werten der Station Waldstein/Pflanzgarten zwischen dem 16.04.2007 und dem 02.05.2007.

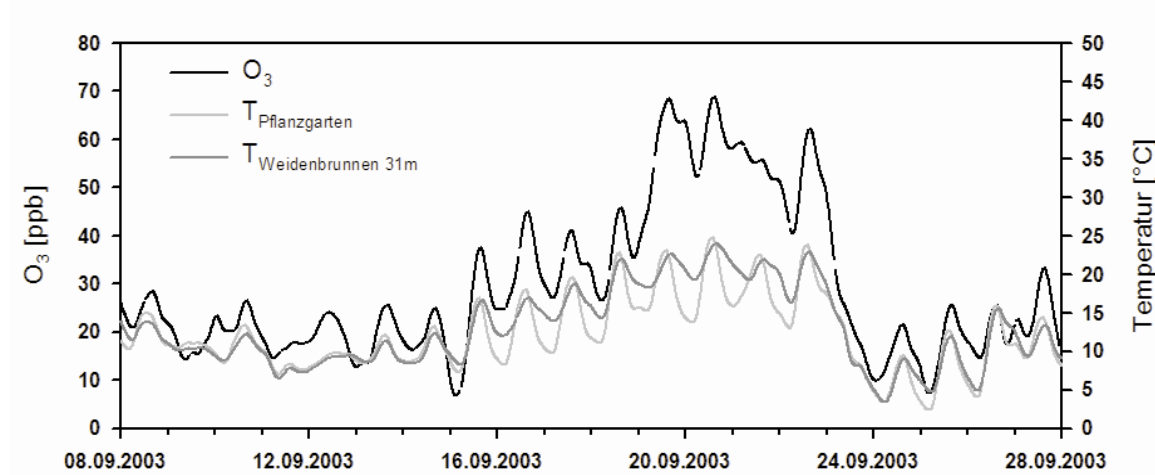


Abbildung 5.14: Ozonkonzentration in ppb und Lufttemperatur in °C der Station Waldstein/Pflanzgarten und der Station Waldstein/Weidenbrunnen in 31 m Höhe bei über 12 Stunden geglätteten Werten zwischen dem 08.09.2003 und dem 28.09.2003.

Vergleichbar mit dem Verlauf der Lufttemperatur war ein parallel gegenläufiger Verlauf der relativen Luftfeuchte zu beobachten. Die gleichzeitig vonstattengehende Reduzierung der relativen Luftfeuchte im Verlauf der Phasen erhöhten Ozonniveaus und im Tagesgang stellt jedoch keine wahre Antikorrelation da, sondern ist auf die Antikorrelation mit der Lufttemperatur zurück zu führen und ist hinsichtlich der Ozonkonzentration lediglich als Scheinkorrelation aufzufassen.

Im Mittel erfolgte bei den Maxima der relativen Luftfeuchte im Tagesverlauf eine Abnahme von 21.3 % im Zuge der Ozonphasen. Die Minima im Tagesverlauf zeigten im Mittel eine Abnahme von 38.2 %.

Im Falle der Maxima der relativen Luftfeuchte im Verlauf der Nachtstunden waren kaum Unterschiede zwischen den verschiedenen Episodentypen bezüglich der negativen Entwicklung im Verlauf der Ozonepisoden zu beobachten. Die absoluten Maxima der relativen Luftfeuchte zu Beginn der Ozonepisoden lagen zwischen 88.9 % und 100 % und betrugen im Mittel 95.7 %. Bei den tagsüber eintretenden Tagesminima der relativen Luftfeuchte zeigten die Episoden der Typen A und der Typen C die größten mittleren Rückgänge mit 42.2 % (15.4 % bis 59.9 %) und 38.2 % (9.3 % bis 64.7 %). Bei den Episoden des Typ B betrugen die Rückgänge mit fortschreitender Episodendauer im Mittel 34.6 % (15.4 % bis 57 %). Die absoluten Minima der relativen Luftfeuchte im Episodenverlauf lagen zwischen 19.1 % und 38.5 % und betrugen im Mittel 31.7 % (Beispiel: Abbildung 5.15).

Wie schon bei der Einteilung der Großwetterlagen während Episoden erhöhter Ozonkonzentration ersichtlich wurde, stellte die großräumige Anströmung aus östlichen Richtungen mit Advektion warmer, trockener kontinental geprägter Luftmassen eine häufige Voraussetzung für das Zustandekommen von Ozonepisoden da. Bekannt ist jedoch für den Standort Waldstein, dass gerade bei Anströmung aus dem südlichen Windsektor auf Grund der topographischen Verhältnisse eine Drehung des bodennahen Windfeldes um ca. 90° im Uhrzeigersinn statt findet. Bei Anströmung aus dem westlichen Windsektor beträgt die Drehung des bodennahen Windfeldes ca. 30° und bei Anströmung aus dem nördlichen Sektor ist unterhalb 400 m Höhe keine Drehung der Windrichtung zu beobachten (Mayer, 2005).

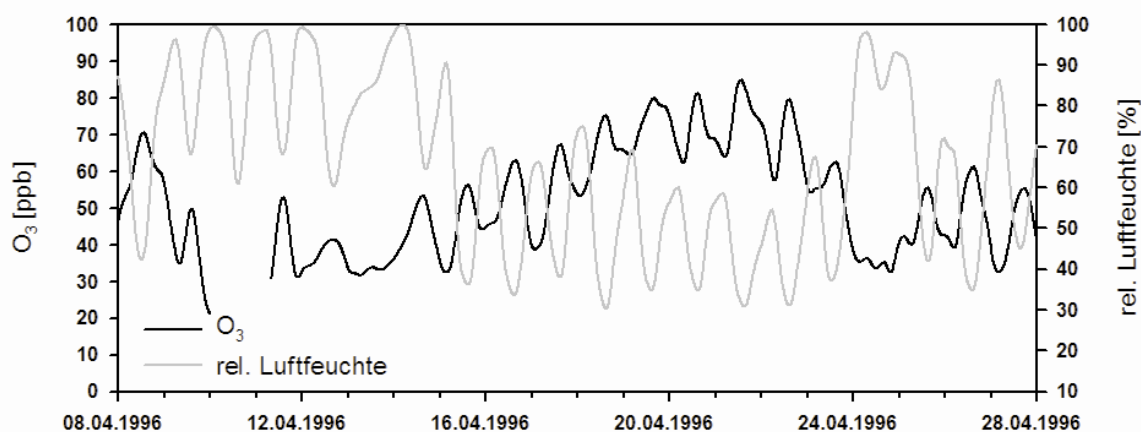


Abbildung 5.15: Ozonkonzentration in ppb und relative Luftfeuchte in % bei über 12 Stunden geglätteten Werten der Station Waldstein/Pflanzgarten zwischen dem 08.04.1996 und dem 28.04.1996.

Am Standort Waldstein/Pflanzgarten traten insgesamt lediglich drei Episoden mit bodennaher Anströmung aus NW auf. 14 Episoden zeigten im Wesentlichen während des ganzen Episodenverlaufes bodennahe Winde aus SE und 13 Episoden erfolgten während Anströmung aus NW am Tage und SE während der Nachtstunden.

Während der Episoden mit bodennaher SE-Anströmung führten kurzzeitige Drehungen der Windrichtung auf NW zu ebenso lange andauernden Unterbrechungen bzw. verminderten Anstiegen des Ozonverlaufes.

Bei zwei Episoden erfolgte der Aufbau der Rampenstruktur während stetiger Windrichtung aus SE. Nach Drehung der bodennahen Anströmung auf Richtungen aus NW verringerte sich die Steigung der Rampenaufbaustruktur bzw. Plateaubildung setzte ein. 14 der insgesamt 32 Episoden begannen an Tagen, an den ein Windrichtungswechsel von bodennaher NW- auf SE-Anströmung erfolgte oder endeten an Tagen mit eindeutiger Winddrehung von SE auf NW mit anschließender länger andauernder Anströmung aus NW, oder zeigten diese beiden Merkmale (Beispiel: Abbildung 5.16).

Alle Episoden erfolgten bei geringen Windgeschwindigkeiten. Das 95%-Perzentil der Windgeschwindigkeit lag bei allen Episoden zwischen 1.6 m s^{-1} und 4.3 m s^{-1} und betrug im Mittel 2.5 m s^{-1} . Bei mehr als 95 % aller Werte der Episoden herrschten also Windgeschwindigkeiten nach der Beaufortskala der Windstärke drei oder kleiner. Nach der Beaufortskala (Wiedersich, 2005) werden Windgeschwindigkeiten zwischen 3.4 und 5.4 m s^{-1} schwache Winde definiert (Tabelle 5.10)

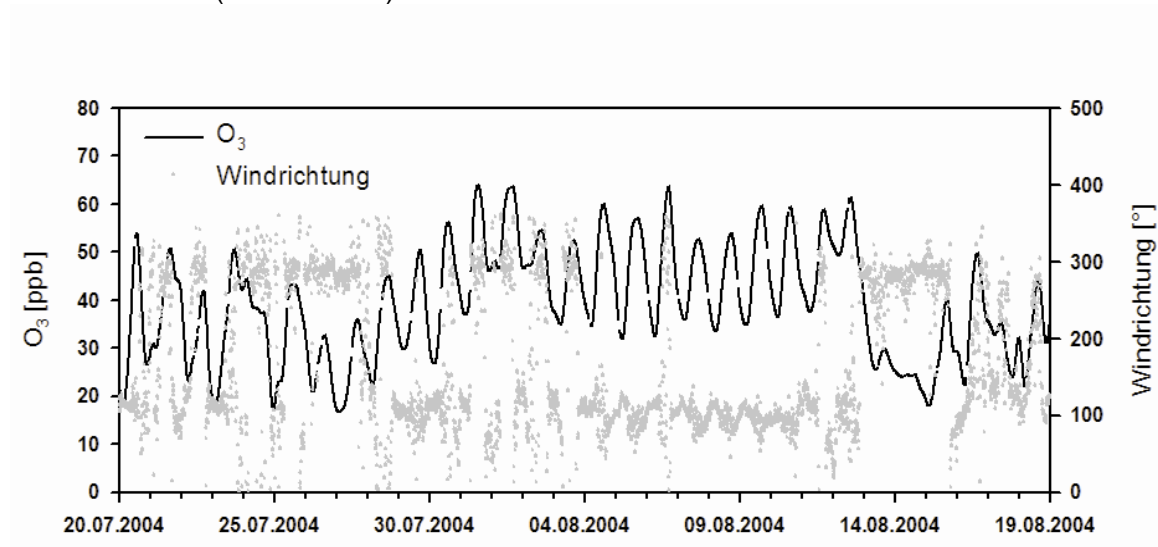


Abbildung 5.16: Ozonkonzentration in ppb und Windrichtung in Grad der Station Waldstein/Pflanzgarten zwischen dem 20.07.2004 und dem 19.08.2004.

Tabelle 5.10: Ausschnitt der Einteilung der Windgeschwindigkeit nach der Beaufortskala (nach Wiedersich (2003)).

Windstärke [Bft]	Windgeschwindigkeit [m s^{-1}]	Bezeichnung
0	0 bis 0.2	Stille
1	0.3 bis 1.5	Fast Stille
2	1.6 bis 3.3	Leichter Wind
3	3.4 bis 5.4	Schwacher Wind
4	5.5 bis 7.9	Mäßiger Wind
5	8.0 bis 10.7	Frischer Wind

Die absolute maximale Windgeschwindigkeit aller Episoden betrug 9.8 m s^{-1} und trat an einem Episodenabbruchtag auf. Im Mittel herrschte bei 1.5 % der Werte im Episodenverlauf Windstille (Windgeschwindigkeit $< 0.2 \text{ m s}^{-1}$).

Bei Mittelung der Maximalwerte der Windgeschwindigkeit der jeweils ersten und letzten beiden Episodentage und aller Tage dazwischen, zeigte sich bei 10 der 32 Episoden eine erhöhte Windgeschwindigkeit der Start- und Abbruchtage gegenüber dem zentralen Episodenabschnitt. Sieben Episoden wiesen erhöhte Werte zu Beginn und am Ende der Episode auf und bei sechs Episoden war eine erhöhte Windgeschwindigkeit nur bei Episodenstart zu verzeichnen. Bei Episoden des Typ A waren im Mittel Erhöhungen der Windgeschwindigkeit um 34 % zu Beginn und Ende der Episoden zu beobachten. Bei Episoden des Typ B und des Typ C beliefen sich diese mittlere Steigerungen der Windgeschwindigkeit auf 50 % (Beispiel: Abbildung 5.17).

Bei der gezielten Suche nach Starkregenereignissen und deren Auswirkungen auf den Verlauf der Ozonkonzentration konnten keine signifikanten Einflüsse und keine vermehrte Konzentrationsabnahme mit zunehmender Niederschlagsintensität gefunden werden. Vielmehr schienen hierbei der Rückgang der Sonneneinstrahlung durch die Wolkenbedeckung und das gleichzeitige Auftreten von Windrichtungswechseln und der dadurch bedingten Luftmassenwechsel die bestimmenden Größen zu sein. Im Zuge dieser Episodencharakterisierung sei an dieser Stelle dennoch der Niederschlag als wichtiger meteorologischer Parameter in die Auswertung miteinbezogen.

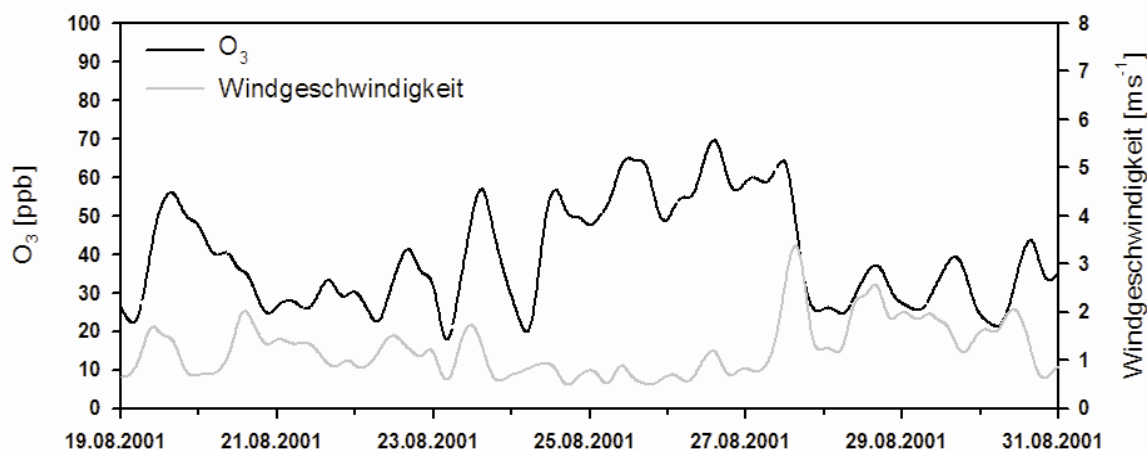


Abbildung 5.17: Ozonkonzentration in ppb und Windgeschwindigkeit in ms^{-1} bei über 12 Stunden geglätteten Werten der Station Waldstein/Pflanzgarten zwischen dem 19.08.2001 und dem 31.08.2001.

Alle Ozonepisoden fanden während niederschlagsarmen Episoden statt. An 225 von 368 Episodentagen (ca. 61 %) mit vorhandenen Niederschlagsdaten fehlte Niederschlag in jeglicher Form. Insgesamt waren bei Episoden des Typ A bei 92 %, bei Episoden des Typ B bei 72 % und bei Episoden des Typ C bei 83 % der 10-min Niederschlagswerte kein Niederschlag zu verzeichnen. Die Niederschlagssummen der Episoden waren im Mittel bei Episoden des Typ B mit 39 mm (11 mm bis 97 mm) am höchsten. Bei Episoden des Typ A betrugen die Niederschlagssumme der gesamten Episoden im Mittel 13 mm (0 mm bis 47 mm) und bei Episoden des Typ C 26 mm (0 mm bis 89 mm). Das Episoden des Typ A die geringsten mittleren Niederschlagssummen zeigten, lässt sich gut mit deren rein rampenartigen Aufbaustruktur in Einklang bringen, da zur Entstehung dieses Verlaufsmusters optimale Bedingungen zum stetigen Ozonakkumulation von Tag zu Tag voraus zusetzen sind, und Wolkenbedeckung mit möglichem Niederschlag dies nicht begünstigen würden.

Elf der insgesamt 32 ausgewählten Episoden wiesen jeweils zu Beginn und am Ende der Episode Tage mit Niederschlag auf. Bei acht Episoden war Niederschlag nur zu Episodenbeginn und bei fünf Episoden nur am Ende der Episode zu beobachten. Lediglich zwei Episoden wiesen keinerlei Niederschlag im gesamten Verlauf auf. Diese waren jedoch die beiden kürzesten Episoden mit einer Episodendauer von jeweils nur fünf Tagen. Bei 18 Ozonepisoden waren während deren Verläufe Niederschläge und gleichzeitige Absenkung bzw. kein weiterer Anstieg der Tagesmaxima im Vergleich zu den vorangegangenen Tagen der Ozonkonzentration und somit Unterbrechung der Episoden zu beobachten. Bei Episoden die zu Beginn noch Niederschlag aufzuweisen hatten, fielen im Mittel in den ersten beiden Episodentagen 7 mm (Typ A), 11 mm (Typ B) und 9 mm (Typ C). Bei Episoden mit Niederschlag am Ende der Episode fielen im Mittel 3 mm (Typ A und Typ C) und 15 mm (Typ B) in den letzten beiden Tagen der Episode.

Bei Auftreten eines Niederschlagsereignisses am Ende einer Ozonepisode waren Abnahmen der Ozontagesminima zwischen dem vorangehenden Tag ohne Niederschlag und dem Abbruchtag der Ozonepisode mit Niederschlagsereignis von 2.2 ppb bis 41.1 ppb zu beobachten. Im Mittel betrugen die Rückgänge der Tagesminima der Ozonkonzentration im Zuge des Episodenabbruches bei Auftreten von Niederschlag 17.6 ppb. Im Falle der Tagesmaxima lagen diese Rückgänge zwischen 3.2 ppb und 23.4 ppb und betrugen im Mittel 14 ppb. Die zugehörigen Niederschläge beliefen sich auf Werte zwischen 0.1 mm und 19.8 mm innerhalb eines Tages.

Bei Episoden, die durch Niederschlagsereignisse an ein oder zwei Tagen kurzzeitig unterbrochen wurden, waren mittlere Absenkungen der Ozonminima von 11 ppb und mittlere Absenkungen der Ozonmaxima von 10 ppb zu beobachten. An den jeweils folgenden Tagen ohne Niederschlag zeigten sich erneute Anstiege der Ozonkonzentrationen. Im Falle der Minima betrugen die mittleren Anstiege des ersten niederschlagsfreien Tages nach der Episodenunterbrechung 4.8 ppb. Bei den Ozonmaxima trat ein mittlerer Konzentrationsanstieg von 7.6 ppb am ersten niederschlagsfreien Folgetag der Episodenunterbrechung auf. Die Episoden unterbrechenden Niederschläge betrugen zwischen 0.5 mm und 43.4 mm.

Bei allen Niederschlägen während der Ozonepisoden die zu Unterbrechung bzw. zum Abbruch der Episode führten ist zu bedenken, dass zunächst einmal der Rückgang der Sonneneinstrahlung durch Bewölkung und die dadurch bedingt verringerte photochemische Ozonproduktion zum geringeren Anstieg bzw. zum Rückgang der Ozonkonzentration führte. Speziell bei den sehr geringen Niederschlägen spielt vermutlich dieser Effekt die entscheidende Rolle. Auf Grund der nur wenigen ausgewählten Episoden und den noch in geringerem Maße aufgetretenen Niederschlägen in diesen Zeiträumen, ist eine Abschätzung des Einflusses der Niederschlagsintensität allein anhand dieser Daten nicht möglich. Eine Erhöhung des Konzentrationsrückganges mit einer Zunahme der Niederschlagsmenge kann gerade bei dieser geringen Datenlage nicht festgestellt werden (Beispiel: Abbildung 5.18).

Auf Grund der Tatsache, dass für Ozon keine direkten Emissionsquellen existieren und die Bildung photochemisch über Stickoxide und der Abbau des Ozons bei fehlender UV-Strahlung in der Atmosphäre neben der Deposition über Stickoxide geregelt wird, und sich je nach Sonneneinstrahlung das photochemische Gleichgewicht verändert, übt die Advektion von Luftmassen mit NO_x -Belastung aus durch Straßenverkehr, Industrie und Haushalte geprägten Ursprungsgebieten einen Einfluss auf die Ozonkonzentration aus.

Abhängig von den meteorologischen Bedingungen ist die Advektion von Luftmassen mit unterschiedlicher Ausprägung des photochemischen Gleichgewichtes und unterschiedlichen NO/NO_2 -Verhältnissen möglich. In Abhängigkeit von der Sonneneinstrahlung und der Zeitspanne seit der Emission des NO werden Luftmassen unterschiedlicher Ozon-, NO_2 - und NO -Zusammensetzung an den Ort der Messung verfrachtet. D.h. an Episodenunterbrechungstagen und Episodenabbruchtagen ist wegen der in aller Regel verminderten Sonneneinstrahlung auch das photochemische Gleichgewicht zu Gunsten des NO_2 verschoben.

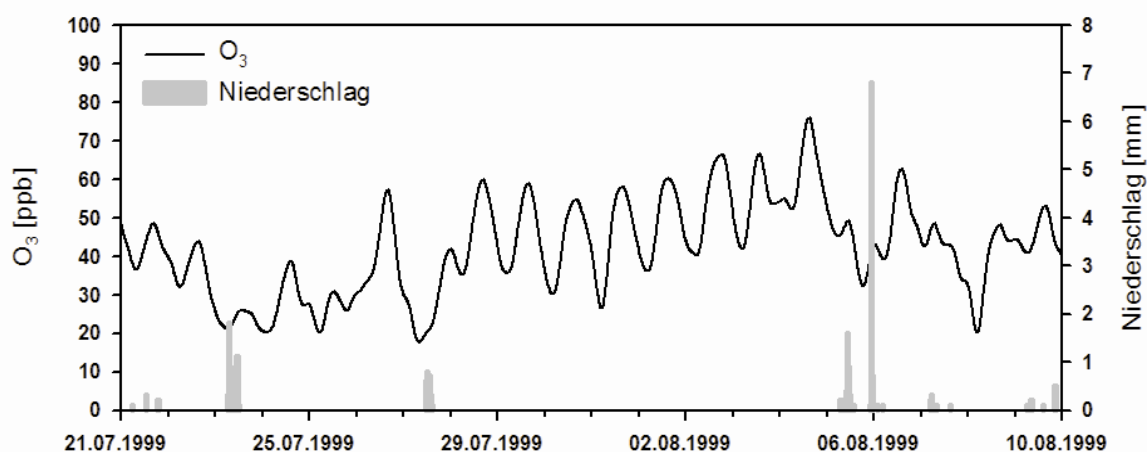


Abbildung 5.18: Ozonkonzentration in ppb und Niederschlag in mm der Station Waldstein/Pflanzgarten zwischen dem 21.07.1999 und dem 10.08.1999.

Auf Grund der Tatsache, dass für Ozon keine direkten Emissionsquellen existieren und die Bildung photochemisch über Stickoxide und der Abbau des Ozons bei fehlender UV-Strahlung in der Atmosphäre neben der Deposition über Stickoxide geregelt wird, und sich je nach Sonneneinstrahlung das photochemische Gleichgewicht verändert, übt die Advektion von Luftmassen mit NO_x -Belastung aus durch Straßenverkehr, Industrie und Haushalte geprägten Ursprungsgebieten einen Einfluss auf die Ozonkonzentration aus. Abhängig von den meteorologischen Bedingungen ist die Advektion von Luftmassen mit unterschiedlicher Ausprägung des photochemischen Gleichgewichtes und unterschiedlichen NO/NO_2 -Verhältnissen möglich. In Abhängigkeit von der Sonneneinstrahlung und der Zeitspanne seit der Emission des NO werden Luftmassen unterschiedlicher Ozon-, NO_2 - und NO -Zusammensetzung an den Ort der Messung verfrachtet. D.h. an Episodenunterbrechungstagen und Episodenabbruchtagen ist wegen der in aller Regel verminderten Sonneneinstrahlung auch das photochemische Gleichgewicht zu Gunsten des NO_2 verschoben.

Bei Erfassung von NO_2 -Spitzenwerten an Episodenunterbrechungs- oder Episodenabbruchtagen ohne gleichzeitiges Auftreten von erhöhten NO -Konzentrationen hat emittiertes NO bereits mit Ozon zu NO_2 reagiert und die Ozonkonzentration ist zu diesem Zeitpunkt reduziert, da bei gleichzeitig vermindelter Sonneneinstrahlung kein Ozon gebildet werden kann. Bei gleichzeitig hoher Sonneneinstrahlung würde die Bildung des NO_2 nach eben diesen Gleichungen zu Erhöhung der Ozonkonzentration führen.

Bei Auftreten von NO-Spitzenwerten an Episodenunterbrechungstagen bzw. an Episodenabbruchtagen ohne das gleichzeitig Auftreten erhöhter NO₂-Werte lässt sich auf eine relativ kurze Zeitspanne zwischen NO-Emission und Ankunft der entsprechenden Luftmasse an der Messstation schließen.

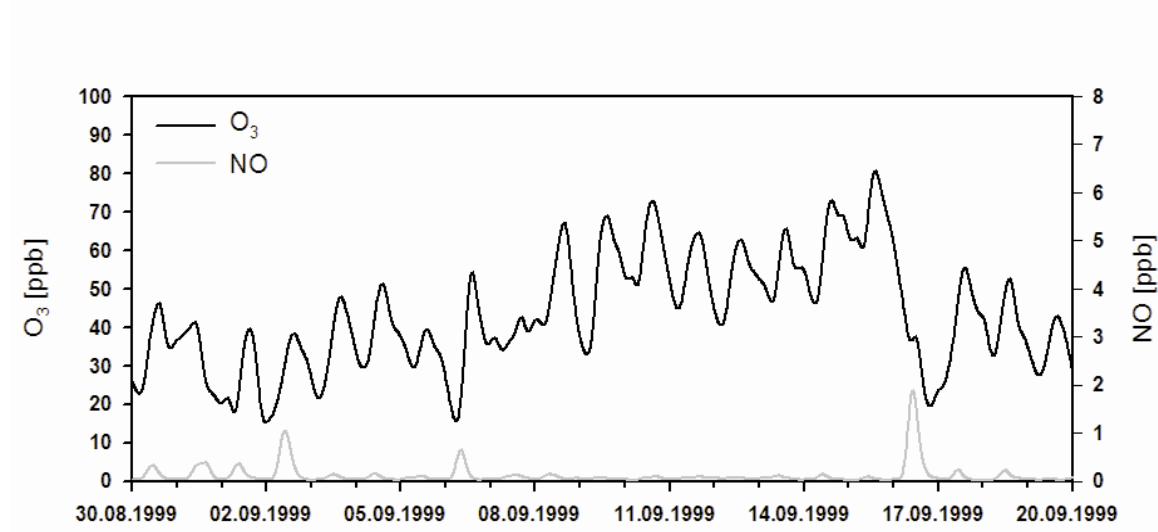


Abbildung 5.19: Ozonkonzentration und NO-Konzentration in ppb bei über 12 Stunden geglätteten Werten der Station Waldstein/Pflanzgarten zwischen dem 30.08.1999 und dem 20.09.1999.

Bei Untersuchung der Ozonepisoden und deren Unterbrechungs- und Abbruchtage zeigten neun der insgesamt 32 Episoden erhöhte NO-Konzentrationen zu Episodenende (Beispiel: Abbildung 5.19). 10 Episoden wiesen Tage mit erhöhten NO-Spitzenwerten und 12 Episoden mit erhöhten NO₂-Spitzenwerten während des Episodenverlaufes auf. Gleichzeitig verminderte Sonneneinstrahlung führte zur Unterbrechung oder Stagnation der Ozonaufbaustrukturen. Deutlich erhöhte NO-Konzentrationen zu Beginn einer Episode trat nur ein einziges Mal auf (NO-Maximum: 8.2 ppb). Im Falle des NO₂ waren bei zwei Episoden die Konzentrationen zu Episodenbeginn deutlich erhöht und begünstigte den Start der Episode (NO₂-Maxima: 13.6 ppb und 13.9 ppb). Im Mittel betrugen die Maximalwerte der klassischen Ozonepisodentage der NO-Konzentration 1.3 ppb und der NO₂-Konzentration 6.5 ppb. Die mittleren Konzentrationsmaxima des jeweils letzten Episodentages mit NO-Advektion beliefen sich auf 4.4 ppb. Bei Episodenunterbrechung mit NO_x-Advektion waren mittlere NO-Konzentrationen von 8.8 ppb und mittlere NO₂-Konzentrationen von 12.9 ppb zu verzeichnen. Unterbrechungstage wiesen also höhere NO_x-Konzentrationen auf als Episodenabbruchtage. Dies ist möglicher Weise damit zu erklären, dass in einigen Fällen der Episodenabbruch an nicht nur einem Tag erfolgte und sich das NO_x-Niveau über diesen Zeitraum leicht erhöhen konnte. Insgesamt zeigten etwa nur ein Drittel der Episoden überhaupt Tage mit erhöhten NO_x-Werten. Eine Unterscheidung gemäß den drei Verlaufsmustern kann hier nicht getroffen werden. Die geringe Anzahl Ereignisse mit erhöhten NO_x-Werten verdeutlicht, dass zwar Vorläufersubstanzen für die Ozonbildung zwingend notwendig sind, jedoch ohne die entsprechenden meteorologischen Bedingungen keine Ozonepisoden entstehen können und an forstlich geprägten Standorten natürlich gebildete Vorläufersubstanzen primär zur Ozonbildung beitragen.

6 Kohlendioxid-Austauschmessungen in Voitsumra

Die Durchführung von Verdunstungsmessungen und Flussmessungen für die Kohlendioxid-aufnahme (Assimilation) und Abgabe (Atmung) eines Ökosystems stellt hohe Anforderungen an einen Standort. Von besonderer Wichtigkeit ist eine so genannte Footprint-Untersuchung (Abbildung 6.1), ob der gemessene Fluss auch der richtigen Unterlage (im Falle von Voitsumra Wiese zugeordnet werden kann (Göckede et al., 2006).

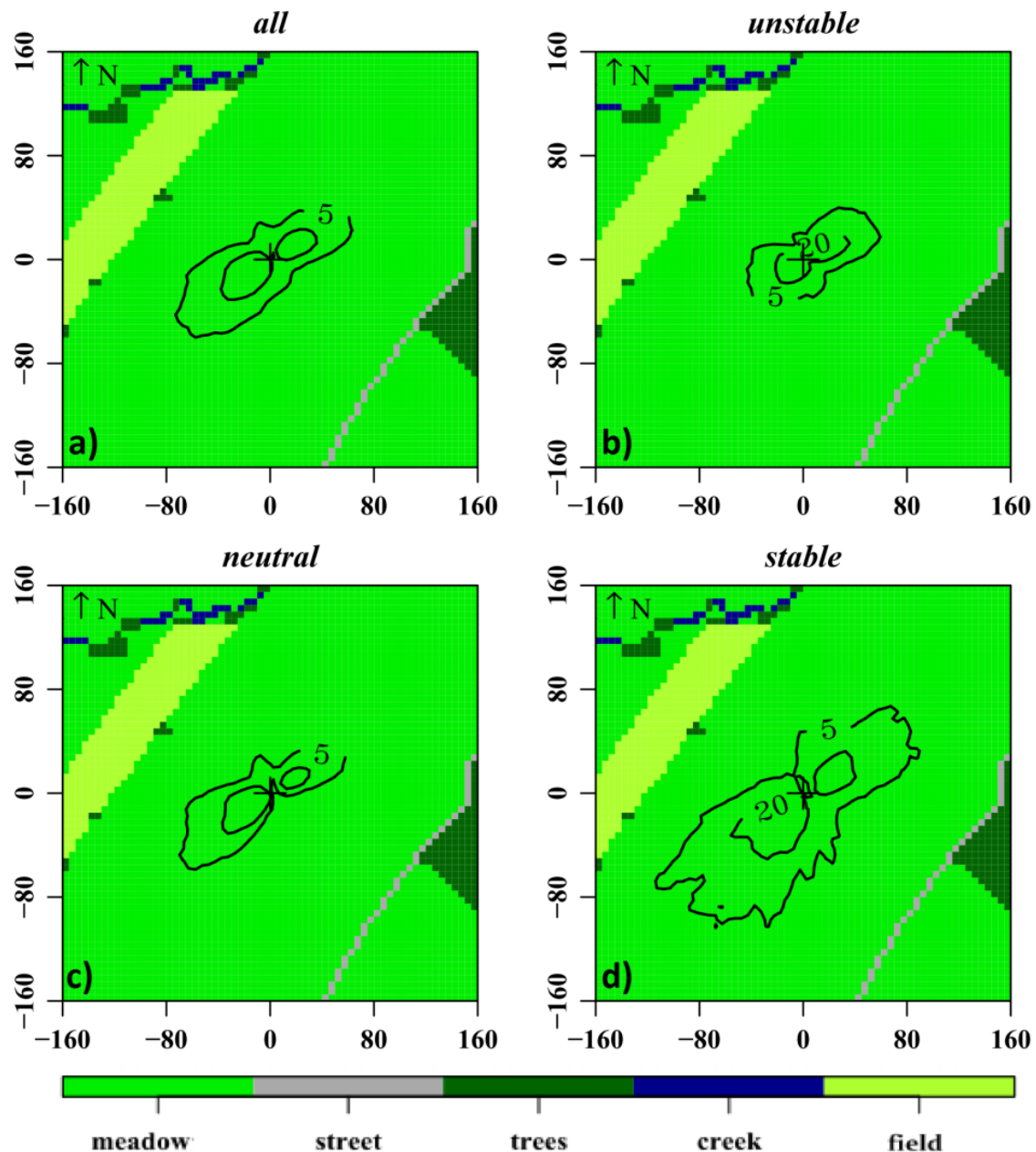


Abbildung 6.1: Footprintanalyse der Station Voitsumra bei verschiedenen atmosphärischen Stabilitäten. Aus einer Fläche innerhalb der mit 5 gekennzeichneten Linie kommen 95 % des gemessenen Kohlenstoffflusses. Damit ist sichergestellt, dass nur der Fluss von Wiesenflächen gemessen wird.

Die Messung der Kohlenstoffflüsse erfolgt mit der sehr aufwendigen Eddy-Kovarianz-Methode (s. u. a. Foken, 2006). Erste Ergebnisse sind für den Spätsommer und Herbst 2009 in Abbildung 6.2 dargestellt. Bis zur Mahd am 21.09.2009 hat die Wiese am Tag kräftig Kohlendioxid aufgenommen. In der Nacht erfolgte die durch die Atmung eine Kohlendioxidabgabe in die Atmosphäre. In der Bilanz war die Wiese aber eine Kohlendioxidsenke, auch wenn durch die abnehmende Tageslänge die gespeicherte Kohlendioxidmenge zurückging. Nach der Mahd nahm die Wiese auch am Tag kaum Kohlendioxid auf. Es dauerte erst fast 2 Wochen bis wieder eine leichte Aufnahme passierte. Letztlich war die Wiese aber ab Ende September nur noch eine sehr schwache Senke oder sogar Quelle.

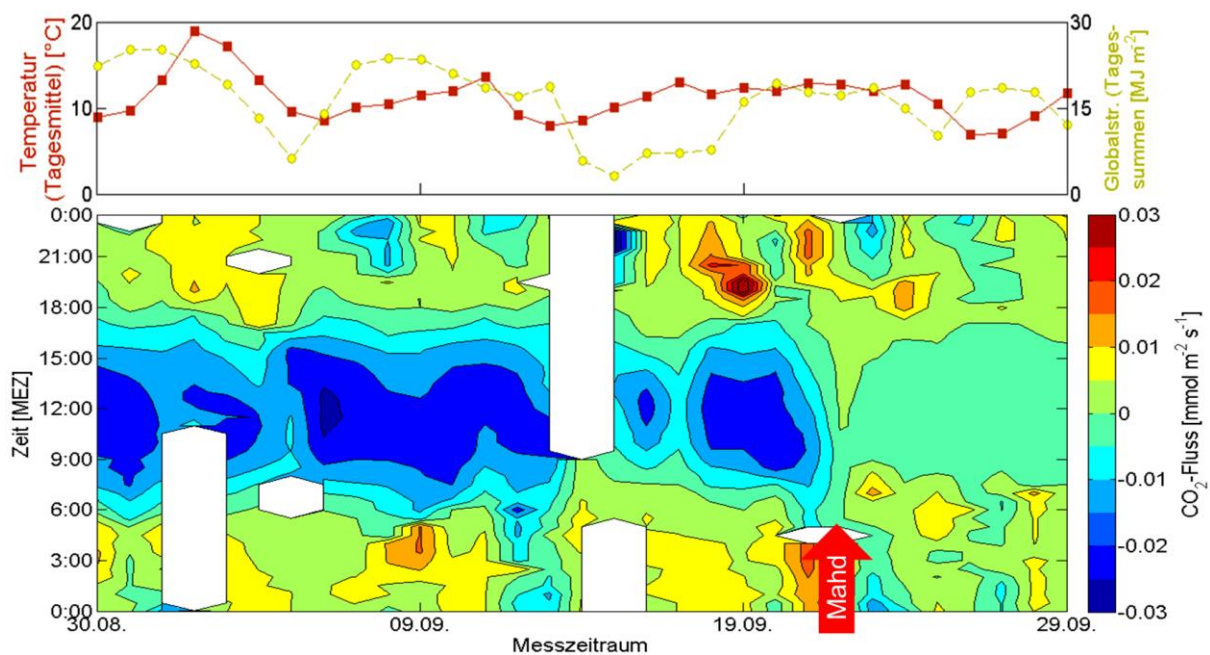


Abbildung 6.2: Tagesgang der Kohlenstoffauf- und -abnahme im Spätsommer und Herbst 2009 in Voitsumra. Der rote Pfeil kennzeichnet den Zeitpunkt der Mahd (Diplomarbeit J. Hübner, Universität Bayreuth, 2010).

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Dank der Unterstützung der Oberfrankenstiftung ist es gelungen, die meteorologischen und lufthygienischen Routinemessungen zu stabilisieren und vorhandene Forschungskapazitäten für die Bearbeitung der Daten einzusetzen. Wesentliche Ausgaben waren die Verlegung und Installation eines Stromanschlusses für die Station Voitsumra. Mit den bislang abgerufenen Mitteln liegen die Ausgaben innerhalb der Planung.

Im Jahre 2009/2010 ist die Inbetriebnahme der Verdunstungs- und Kohlendioxidaustauschmessungen an der Station Voitsumra realisiert worden. Des Weiteren wurde 2009/2010 durch die Modernisierung der Datenfernübertragungstechnik an der Forschungseinrichtung am Waldstein die Anfälligkeit gegenüber Blitzschlag reduziert. Im Jahre 2010/2011 soll die Bearbeitung der seit 1996 durchgeführten Verdunstungs- und Kohlendioxidaustauschmessungen an der FLUXNET-Station DE-Bay am Waldstein/Weidenbrunnen beginnen.

Die im vorherigen Jahresbericht 2008 erfolgte Auswertung der Zeitreihen hinsichtlich zeitlicher Entwicklung zeigte für das Ozon einen Anstieg der Hintergrund-, Dauer- und Extrembelastungen bis zum Jahre 1999. Danach waren leicht rückläufige Konzentrationen zu beobachten. Die Monate Januar und März zeigten stetige Zunahmen Hintergrundbelastung mit gleichzeitigem Anstieg der Globalstrahlung. Die Hintergrundbelastung der Monate April bis August ist bis Mitte der 1990er Jahre kontinuierlich Angestiegen. Danach war ein leicht rückläufiges Verhalten zu beobachten. Die Dauer- und Spitzenbelastungen durch Ozon stiegen bis Mitte der 1990er Jahre an und verliefen anschließend auf nahezu konstantem Niveau bzw. zeigten ein rückläufiges Verhalten. Dieser Rückgang zeigte sich besonders im August bei gleichzeitiger Abnahme der monatlichen Strahlungssumme. Die NO_x -Dauerbelastungen zeigten keinen Trend im betrachteten Zeitraum. Die Spitzenbelastungen scheinen sich leicht rückläufig zu verhalten. Die Hintergrund-, Dauer- und Extremkonzentrationen der SO_2 -Konzentration sind seit Beginn der Datenerfassung beachtlich zurückgegangen. Den entscheidenden Beitrag zur Abnahme der Jahresperzentile leisteten die Wintermonate. Im Januar 1997 war die letzte starke SO_2 -Episode mit monatlichen 95 %-Perzentil von über 40 ppb zu beobachten. Seitdem zeigte sich erstmals wieder im Jahr 2006 eine SO_2 -Spitze der Monatswerte von über 15 ppb. Bei Einteilung der Jahresspitzenwerte nach zwölf Windrichtungssektoren war sowohl für Ozon, als auch für die NO_x -Werte keine bevorzugte Richtung auszumachen. Bei Einteilung der NO -Jahresspitzenwerte zeigten fünf der elf Jahre die höchsten Konzentrationen bei Anströmung aus SW bis NW. Die SO_2 -Werte zeigten über die Jahre hinweg die höchste Belastung bei Anströmung aus NE bis SE (siehe in Detail Diplomarbeit Barbara Grasse, 2009, Abteilung Mikrometeorologie, Universität Bayreuth).

Nach den starken Überschreitungen des AOT40-Schwellwertes von 9000 ppb h in den 1990er Jahren schwanken die AOT40-Werte seit dem Jahr 2000 vermehrt um den Zielwert von 9000 ppb h der nach der BImSchV ab dem Jahr 2010 einzuhalten ist (Abbildung 5.1).

Die dauerhafte Überschreitung des AOT40-Schwellwertes bei Tiefpassfilterung über 21 Tage fand bis zum Jahr 2000 regelmäßig zwischen dem 04. April und dem 05. September statt. Seit dem Jahr 2000 erfolgte eine Einengung dieses Bereiches. Die Überschreitung des AOT40 findet seitdem nur noch zwischen dem 09. Mai und dem 05. August sporadisch statt (Abbildung 5.2).

Die absoluten Ozonmaxima sind bei stark ausgeprägter Erstfrühlingsepisode um den 28. April. Ist diese Erstfrühlingsepisode nur gering ausgeprägt tritt das Jahresmaximum der Ozonkonzentration im Mittel um den 06. August in Folge einer heißen und trockenen Hochsommerphase auf (Abbildung 5.4). Bei Ermittlung der mittleren monatlichen Tagesgänge stellte sich heraus, dass in den Monaten Januar, Februar und März eine Anhebung des Niveaus stattgefunden hat. Der Monat August zeichnete sich erneut durch rückläufiges Verhalten aus. Gleichzeitig war eine kontinuierliche Abnahme der Amplitude des Tagesgangs im Februar, Mai, Juni, August, November und Dezember zu beobachten. Die Monate Januar, Juli und Oktober zeigten eine kontinuierliche Erhöhung der Tagesamplitude (Abbildung 5.7). Die Ausbildung nächtlicher atmosphärischer Schichtung wirkte sich entscheidend auf den Verlauf des Tagesgangs aus. Tage mit Ausbildung einer starken nächtlichen atmosphärischen Schichtung zeigten bei den Minima im Mittel 10 bis 25 % höhere Werte im Gegensatz zu Tagen, an den sich keine nächtliche stabile atmosphärische Schichtung ausbildete. Die Maxima waren ebenfalls um 15 bis 25 % höher. Die Amplituden der Tage ohne nächtliche stabile atmosphärische Schichtung fielen zwischen 67 und 78 % geringer aus. Auch wurde deutlich, dass das Auftreten von Nebelereignissen gravierenden Einfluss auf die Ausbildung des Ozontagesgangs ausübt. Im Winter betrugen die Minima, Maxima und Amplituden der Nebeltage nur 75 %, 77 % und 78 % der Strahlungstage. Im Sommer zeigten sich noch gravierender Unterschiede. Hier betrugen die Minima, Maxima und Amplituden der Nebeltage nur 63 %, 65 % und 67 % der Strahlungstage. Bei gleichzeitiger Einteilung der Strahlungstage nach der bodennahen Anströmung ergaben sich die höchsten Minima, Maxima und Tagesamplituden bei Anströmung am Tage aus NW und Drehung des Windes am Abend auf SE. Die geringsten Werte ergaben sich bei ganztägiger Anströmung aus NW. Sie betrugen 84 %, 76 % und 69 % der Werte der Tage mit Anströmung aus NW am Tage und SE in der Nacht. Bei ganztägiger Anströmung aus SE waren mittlere Werte zu beobachten. Sie betrugen 88 %, 92 % und 96 % der Werte der Tage mit Anströmung aus NW am Tage und SE in der Nacht. Die Charakterisierung Episoden erhöhter Ozonkonzentration hinsichtlich typischer Verlaufs-, Aufbaubau- und Abbruchmuster erfolgte anhand der Minima, Maxima und Amplitude der gesamten Episoden und der Entwicklung der Tagesminima, -maxima und -amplituden im Verlauf der Episoden. Danach konnten die Ozonphasen in drei typische Verläufe eingeteilt werden. Die anschließende Betrachtung nach steuernden und korrelierenden bzw. anti-korrelierenden und schein-korrelierenden meteorologischen und luftchemischen Größen und Bedingungen wie Strahlung, Anströmrichtung, Windgeschwindigkeit, Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchte, Großwetterlagen und NO_x-Advektion als Kriterien des Auftretens, der Unterbrechung und des Abbruchs von Phasen stark erhöhter Ozonkonzentration ist in Kapitel 5.4.3 erläutert.

Eine genaue Einschätzung des quantitativen Einflusses eines jeden dieser Größen auf den Verlauf der Ozonkonzentration ist leider auch nach der erfolgten Charakterisierung der ausgewählten Episoden nicht möglich. Dazu müssten Methoden gefunden werden die genaue Auswirkung eines jeden einzelnen Parameters zu separieren und unabhängig voneinander zu analysieren. Dabei könnte ein Ansatz sein, über die Geschwindigkeit der Reaktion der Ozonkonzentration, also über Unterscheidung zwischen schlagartigem Anstieg bzw. Rückgang und einer langsam einhergehenden Veränderung der Konzentration als Reaktion auf die Änderung des bestimmenden Einflussparameters zu schließen. Gerade die spannende Frage der Unterscheidung zwischen primär und sekundär gebildeten Ozon bedarf anderer Herangehensweisen. Diese Charakterisierung anhand der beschriebenen meteorologischen Faktoren kann jedoch zur Abschätzung des zukünftigen Auftretens Phasen stark erhöhten Ozonkonzentrationsverlaufs dienen und bei Kenntnis von künftigen klimatischen Veränderungen Aufschluss über die Zeiträume mit vermehrter oder verringerter Eintrittswahrscheinlichkeit geben. Auch kann sie zur Einschätzung der zukünftigen Episodenintensität dienen. Da sich bei der Trendauswertung von Ozon, NO_x und SO_2 , auf Jahresbasis und besonders bei der Analyse der Monatswerte, bei der Entwicklung des Ozons hinsichtlich Tages- und Jahresgang, der Variation der Über- und Unterschreitung des gesetzlichen Schwellwertes zum Schutze der Vegetation vor bodennahem Ozon AOT40 und der zeitlichen Variabilität des Auftretens der Minima und Maxima im Jahresverlauf überraschende Ergebnisse ergeben haben, ist es auch in Zukunft von größter Bedeutung die weiteren Entwicklungen zu beobachten. Nach diesem ersten Versuch Phasen erhöhter Ozonkonzentration anhand der bestehenden Datengrundlage zu charakterisieren und der gleichzeitigen Auswertung der parallelen Verläufe der zugehörigen meteorologischen und luftchemischen Daten, wäre es wünschenswert genaueren Methoden zu finden, um eindeutige Eingangsparameter für Modellansätze zu bestimmen um zukünftige Verhaltensweisen des Ozons unter veränderten klimatischen Bedingungen abzuschätzen. Interessant wäre auch die Überlegung welche anderen luftchemischen Spezies einer derartigen Untersuchung unterzogen werden könnten. Ob und wenn ja welchen Aufbau- und Abbaumuster andere luftchemische Größen unterliegen. Auch wären Untersuchungen hinsichtlich der Übertragbarkeit solcher Charakterisierung und daraus entstehender Modellansätze auf andere Standorte wichtig.

8 Literaturverzeichnis

- Augustaitis, A., Bytnerowicz, A., 2008. Contribution of ambient ozone to Scots pine defoliation and reduced growth in the Central European forests: A Lithuanian case study. *Environmental Pollution*, 155, S. 436-445.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2007a. Lanzeitmessungen. <http://www.lfu.bayern.de/luftdaten/langzeitverlaeufe/index.htm> [Stand: 01.03.2007].
- Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2007b. Lufthygienischer Jahresbericht 2006, 145 S.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2007c. Umweltbericht Bayern 2007, 170 S.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2008a. Das Lufthygienische Landesüberwachungssystem Bayern (LÜB), 6 S.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2008b. Lufthygienisches Landesüberwachungs-system (LÜB). Dokumentation des Luftmessstationen. [online], <http://inters.bayern.de/luebdoc/html/luebdocu.php> [Stand: 16.12.2008].
- Beck-Texte, 2005. Umweltrecht: UPV Umweltaudit Natur, Tier-u. Bodenschutz Gewässer Abfälle Luftreinhaltung Lärmbekämpfung Klimaschutz Reaktorsicherheit Energieeinsparung u. Erneuerbare Energien Gefahrenstoffe Umweltstrafrecht, 17. Auflage, Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 1143 S.
- Beierkuhnlein, C., Foken, T., 2008. Klima Wandel in Bayern. Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten. Bayreuther Forum Ökologie, Vol. 113, 501 S.
- Bissolli, P., Dittmann, E., 2001. The objective weather type classification of the German Weather Service and its possibilities of application to environmental and meteorological investigations. *Meteorologische Zeitschrift*, 10, S. 253-260.
- Böer, W., Vesecký, A., 1973. Klima und Witterung im Erzgebirge. Abhandlung des Meteorologischen Dienstes der Deutschen Demokratischen Republik, Akademie Verlag, Berlin, Band 13, Nr. 104, 166 S.
- Dawnay, L., Mills, G., 2009. Relative effects of elevated background ozone concentrations and eak episodes on senescence an above-ground groth in four populations of *Anthoxanthum odoratum* L.. *Environmental Pollution*, 157, S. 503-510.
- Dittmann, E., Barth, S., Lang, J., Müller-Westermeier, G., 1995. Objektive Wetterklassifikation. *Berichte des Deutschenwetterdienstes* 197, 41 S.
- Foken, T., 2001. Luftygienisch-bioklimatische Kennzeichnung des oberen Egertales, Abschlussbericht des Projektes 111450 des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen. Arbeitsergebnisse Nr. 14. 67 S.
- Foken, T., 2003. Luftygienisch-bioklimatische Kennzeichnung des oberen Egertales (Fichtelgebirge bis Karlovy Vary). Bayreuther Forum Ökologie, Band 100, 70 S.
- Foken, T., 2004. Climate Change in the Lehstenbach Region. In: Matzner, E. (Editor), Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment. A German case study. *Ecological Studies*, Springer Verlag, Heidelberg, 172, S. 59-66.
- Foken, T., 2005. Klimatologische und mikrometeorologische Forschung im Rahmen des Bayreuther Institutes für Terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK) 1989-2004. Arbeitsergebnisse Nr. 29, 106 S.
- Foken, T., 2006. Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden. 2. Auflage, Springer Verlag, 325 S.
- Fuhrer, J., Skärby, L., Ashmore, M. R., 1997. Critical levels for ozone effects on vegetaion in Europe. *Environmental Pollution*, 97, S. 91-106.
- Gerosa, G., Marzuoli, R., Rossini, M., Panigada, C., Meroni, M., Colombo, R., Faoro, F., Iriti, M., 2008. A flux-based assessment of the effects of ozone on foliar injury, photosynthesis, and yield of bean (*Phaseolus vulgaris* L. Borlotto Nano Lingua di Fuoco) in open-top chambers. *Environmental Pollution*. Article in press. S. 1-10.

- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P. C., Rüge, U., 1999. Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-1998) Nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, 5. Auflage, 138 S.
- Göckede, M., Markkanen, T., Hasager, C. B., and Foken, T. 2006. Update of a footprint-based approach for the characterisation of complex measuring sites, *Boundary-Layer Meteorol.*, 118, 635-655.
- Greenhut, G., Jochum, A. M., Neininger, B., 1995. Boundary-layer turbulent transport and production/destruction of ozone during summertime smog episodes over the swiss plateau. *Boundary-Layer Meteorology*, 73, S. 357-372.
- Harrison, R. M., Holman, C. D., McCartney, H. A., McIlveen, J. F. R., 1978. Nocturnal depletion of photochemical ozone at a rural site. *Atmospheric Environment*, 12, S. 2021-2026.
- Hastie, D. R., Shepson, P. B., Reid, N., Roussel, P. B., Melo, O. T., 1995. Summertime NO_x , NO_y , and ozone at a site in rural Ontario. *Atmospheric Environment*, 30, S. 2157-2165.
- Hastie, D. R., Shepson, P. B., Sharma, S., Schiff, H. I., 1993. The influence of the nocturnal boundary layer on secondary trace gas species in the atmosphere at Dorset, Ontario. *Atmospheric Environment*, 27A, S. 533-541.
- Helbig, A., Baumüller, J., Kerschgens, M. J. (Editors), *Stadtklima und Luftreinhaltung*. Springer, Berlin, Heidelberg, 467 S.
- Herbinger, K., Then, C., Löw, M., Haberer, K., Alexous, M., Koch, N., Remele, K., Heerdt, C., Grill, D., Rennenberg, H., Häberle, K.-H., Matyssek, R., Tausz, M., Wieser, G., 2005. Tree dependence and within-canopy variation of leaf gas exchange and antioxidative defence in *Fagus sylvatica* under experimental free-air ozone exposure. *Environmental Pollution*, 137, S. 476-482.
- Karlsson, P. E., Uddling, J., Braun, S., Broadmeadow, M., Elvira, S., Gimeno, B. S., Le Thiec, D., Oksanen, E., Vandermeiren, K., Wilkinson, M., Emberson, L., 2004. New critical levels for ozone effects on young trees based on AOT40 and simulated cumulative leaf uptake of ozone. *Atmospheric Environment*, 38, S. 2283-2294.
- Kelly, N. A., Wolff, G. T., Ferman, M. A., 1984. Sources and sinks of ozone in rural areas. *Atmospheric Environment*, 18, S. 1251-1266.
- Kitao, M., Löw, M., Heerdt, C., Grams, T. E. F., Häberle, K.-H., Matyssek, R., 2009. Effects of chronic elevated ozone exposure on gas exchange response of adult beech trees (*Fagus sylvatica*) as related to the within-canopy light gradient. *Environmental Pollution*, 157, S. 537-544.
- Klemm, O., 2001. Local and Regional Ozone. A Student Study Project. *Journal of Chemical Education*. Vol. 78, No. 12, S. 1641-1646.
- Klemm, O., 2004. Trace Gases and Particles in the Atmospheric Boundary Layer at the Waldstein Site: Present State and Historic Trends. In: Matzner, E. (Editor), *Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment. A German case study*. Ecological Studies, Springer Verlag, Heidelberg, 172, S. 45-58.
- Klemm, O., Held, A., Forkel, R., Gasche, R., Kanter, H.-J., Rappenglück, B., Steinbrecher, R., Müller, K., Plewka, A., Cococariu, C., Kreuzwieser, J., Valverde-Canossa, J., Schuster, G., Moortgat, G. K., Graus, M., Hansel, A., 2006. Experiments on forest Atmosphere exchange: Climatology and fluxes during two summer campaigns in NE Bavaria. *Atmospheric Environment*, 40, S. 3-20.
- Klemm, O., Lange, H., 1999. Trends of Air Pollution in the Fichtelgebirge Mountains, Bavaria. *Environmental Science & Pollution Research*, 6, S. 193-199.
- Klemm, O., Mangold, A., 2001. Ozone deposition at a forest site in NE Bavaria. *Water, Air, and Soil Pollution, Focus* 1, S. 223-232.
- Klemm, O., Mangold, A., Held, A., 2004. Turbulent deposition of ozone to a mountainous forest ecosystem. In: Matzner, E. (Editor), *Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment. A German case study*. Ecological Studies, Springer Verlag, Heidelberg, 172, S. 203-213.
- Klumpp, A., Ansel, W., Klumpp, G., Vergne, P., Sifakis, N., Sanz, M. J., Rasmussen, S., Ro-Poulsen, H., Ribas, Á., Peñuelas, J., Kambezidis, H., He, S., Garrec, J. P., Calatayud, V., 2006. Ozone pollution and ozone biomonitoring in European cities Part II. Ozone-induced plant injury and its relationship with descriptors of ozone pollution. *Atmospheric Environment*, 40, S. 7437-7448.

- Lüers, J., Foken, T. 2009. Jahresbericht 2008 zum Förderprojekt 01879 – Untersuchung der Veränderung der Konzentration von Luftbeimengungen und Treibhausgasen im hohen Fichtelgebirge, 2007 – 2013. Univ. Bayreuth, Abt. Mikrometeorol., ISSN 1614-89166, 39, 25 pp.
- Matyssek, R., Wieser, G., Nunn, A. J., Löw, M., Then, C., Herbinger, K., Blumenröther, M., Jehnes, S., Reiter, I. M., Heerdt, C., Koch, N., Häberle, K.-H., Haberer, K., Werner, H., Tausz, M., Fabian, P., Rennenberg, H., Grill, D., Oßwald, W., 2006, How sensitive are forest trees to ozone? – New research on an old issue. In: Omasa, K., Nouch, I., De Kok, L.J. (Editors), Plant response to air pollution and global change. Springer-Verlag, Tokyo, S.21-28.
- Mayer, J.-C., 2005. Charakterisation of the atmospheric boundary layer in a complex terrain using SODAR-RASS.
- Monks, P. S., 2000. A review of the observations and origins of the spring ozone maximum. *Atmospheric Environment*, 34, S. 3545-3561.
- Olszyna, K. J., Luria, M., Meagher, J. F., 1997. The correlation of temperature and rural ozone levels in southeastern U.S.A.. *Atmospheric Environment*, 31, S. 3011-3022.
- Österle, H., Glauer, J., Denhard, M., 1999. Struktur, Aufbau und statistische Programmbibliothek der meteorologischen Datenbank am Potsdamer-Institut für Klimaforschung. PIK-Report Nr. 49, Potsdam, 109 S.
- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., 1998. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, Wiley, New York, 1326 S.
- Staudt, K., Foken, T., 2007. Documentation of reference data for the experimental areas of the Bayreuth Center for Ecology and Environmental Research (BayCeer) at the Waldstein site, Arbeitsergebnisse Nr. 35, 37 S.
- Stull, R., 2000. *Meteorology for scientists and engineers*. Brooks/ Cole, 2. Auflage, 502 S.
- Tekan AG, 1989. CLD 700 AL, Chemilumineszenz NO/NO_x-Analysator.
- Thermo Environmental Instruments Inc., 1996. Model 43 C, Trace Level Pulsed Fluorescence SO₂ Analyzer, Franklin.
- Utiyama, M., Fukuyama, T., Maruo, Y. Y., Ichino, T., Izumi, K., Hara, H., Takano, K., Suzuki, H., Aoki, M., 2004. Formation and deposition of ozone in a red pine forest. *Water, Air, and Soil Pollution*, 151, S. 53-70.
- Vingarzan, R., 2004. A review of surface ozone background levels and trends. *Atmospheric Environment*, 38, S. 3431-3442.
- Wang, X., Zheng, Q., Feng, Z., Xie, J., Feng, Z., Quyang, Z., Manning, W. J., 2008. Comparison of a diurnal vs steady-state ozone exposure profile on growth and yield of oilseed rape (*Brassica napus* L.) in open-top chambers in the Yangtze Delta, China. *Environmental Pollution*, 156, S. 449-453.
- Wiedersich B. (Editor), 2003. *Taschenatlas Wetter, Die turbulente Atmosphäre der Erde*, Klett Perthes, Gotha, 288 S.
- Wrzesinsky, T., Klemm, O., 2000. Summertime fog chemistry at a mountainous site in central Europe. *Atmospheric Environment*, 34, S. 1487-1496.
- Wrzesinsky, T., Scheer, C., Klemm, O., 2004. Fog Deposition and its Biochemical Cycles of Nutrients and Pollutants. In: Matzner, E. (Editor), *Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment. A German case study*. Ecological Studies, Springer Verlag, Heidelberg, 172, S. 191-2002.

9 Anhang

Tabelle 9.1: Gleichungen linearer Regressionsfunktionen (Rf) und zugehörige Signifikanzen (Si) nach Mann-Kendall der 10%-/ 50%- und 95%-Jahresperzentile von Ozon, NO_x und SO₂ der 30-min Mittelwerte der Station Waldstein/Pflanzgarten.

	Rf	Si [%]
O₃ P10	$y=0.24x+7.59$	78
O₃ P50	$y=0.30x+22.85$	60
O₃ P95.	$y=0.21x+52.85$	25
NO_x P50	$y=-0.07x+5.93$	76
NO_x P95	$y=-0.44x+21.00$	99
SO₂ P50	$y=-0.071x+2.04$	100
SO₂ P95	$y=-2.21x+45.56$	100

Tabelle 9.2: Gleichungen partieller linearer Regressionsfunktionen (Rf) und zugehörige Signifikanzen (Si) nach Mann-Kendall der 50%- und 95%-Jahresperzentile von SO₂ der 30-min Mittelwerte der Station Waldstein/Pflanzgarten (a: 1985-1998; b: 1998-2006).

	Rf	Si [%]
SO₂ P50_a	$y=-0.13x+2.42$	100
SO₂ P50_b	$y=0.08x+0.37$	96
SO₂ P95_a	$y=-2.52x+48.11$	99
SO₂ P95_b	$y=-0.13x+4.54$	62

Tabelle 9.3: Gleichungen linearer Regressionsfunktionen (Rf) und zugehörige Signifikanzen (Si) nach Mann-Kendall der 10%-/ 50%- und 95%-Monatsperzentile von Ozon der 30-min Mittelwerte der Station Waldstein/Pflanzgarten.

	Rf	Si [%]
O₃ P10 Jan	$y=0.50x+1.99$	100
O₃ P50 Jan	$y=0.57x+11.68$	98
O₃ P95 Jan	$y=0.49x+25.34$	90
O₃ P10 Feb	$y=0.42x+6.88$	79
O₃ P50 Feb	$y=0.48x+18.41$	90
O₃ P95 Feb	$y=0.27x+34.45$	13
O₃ P10 März	$y=0.54x+10.30$	99
O₃ P50 März	$y=0.51x+22.73$	90
O₃ P95 März	$y=0.24x+43.16$	86
O₃ P10 April	$y=0.07x+22.94$	17
O₃ P50 April	$y=0.05x+36.44$	22

O₃ P95 April	$y=-0.09x+59.00$	60
O₃ P10 Mai	$y=0.27x+20.56$	85
O₃ P50 Mai	$y=0.24x+35.02$	52
O₃ P95 Mai	$y=0.56x+52.59$	77
O₃ P10 Juni	$y=0.29x+18.79$	80
O₃ P50 Juni	$y=0.39x+31.71$	86
O₃ P95 Juni	$y=0.59x+51.24$	76
O₃ P10 Juli	$y=0.21x+18.36$	49
O₃ P50 Juli	$y=0.15x+33.65$	35
O₃ P95 Juli	$y=0.13x+61.14$	21
O₃ P10 Aug	$y=0.14x+18.34$	33
O₃ P50 Aug	$y=-0.11x+37.43$	64
O₃ P95 Aug	$y=-0.33x+66.89$	58
O₃ P10 Sep	$y=0.15x+12.50$	81
O₃ P50 Sep	$y=0.13x+24.76$	37
O₃ P95 Sep	$y=0.35x+43.12$	53
O₃ P10 Okt	$y=0.03x+8.42$	0
O₃ P50 Okt	$y=0.00x+19.98$	35
O₃ P95 Okt	$y=-0.25x+36.66$	74
O₃ P10 Nov	$y=0.03x+3.22$	43
O₃ P50 Nov	$y=0.16x+13.10$	72
O₃ P95 Nov	$y=0.08x+27.01$	49
O₃ P10 Dez	$y=0.11x+3.16$	56
O₃ P50 Dez	$y=0.19x+14.21$	78
O₃ P95 Dez	$y=0.19x+27.89$	35

Tabelle 9.4: Gleichungen linearer Regressionsfunktionen (Rf) und zugehörige Signifikanzen (Si) nach Mann-Kendall der 50%- und 95%-Monatsperzentile von NO_x der 30-min Mittelwerte der Station Waldstein/Pflanzgarten.

	Rf	Si [%]
NO_x P50 Jan	$y = -0.16x + 9.52$	76
NO_x P95 Jan	$y = -0.33x + 23.21$	87
NO_x P50 Feb	$y = -0.32x + 12.14$	56
NO_x P95 Feb	$y = -0.86x + 31.32$	82
NO_x P50 März	$y = -0.13x + 8.43$	29
NO_x P95 März	$y = -0.37x + 18.68$	92
NO_x P50 April	$y = -0.15x + 7.95$	66
NO_x P50 April	$y = -0.40x + 16.82$	88
NO_x P95 Mai	$y = -0.17x + 7.16$	48
NO_x P50 Mai	$y = -0.40x + 15.03$	94
NO_x P50 Juni	$y = -0.13x + 6.06$	21
NO_x P95 Juni	$y = -0.51x + 15.37$	87
NO_x P50 Juli	$y = -0.05x + 4.47$	66
NO_x P95 Juli	$y = -0.20x + 9.78$	66
NO_x P50 Aug	$y = 0.05x + 2.58$	94
NO_x P95 Aug	$y = -0.03x + 6.99$	61
NO_x P50 Sep	$y = 0.07x + 2.84$	92
NO_x P95 Sep	$y = -0.01x + 7.94$	3
NO_x P50 Okt	$y = 0.02x + 4.59$	35
NO_x P95 Okt	$y = -0.25x + 15.38$	99
NO_x P50 Nov	$y = -0.04x + 6.88$	53
NO_x P95 Nov	$y = -0.48x + 26.36$	91
NO_x P50 Dez	$y = -0.01x + 6.92$	15
NO_x P95 Dez	$y = -0.22x + 23.57$	60

Tabelle 9.5: Gleichungen linearer Regressionsfunktionen (Rf) und zugehörige Signifikanzen (Si) nach Mann-Kendall der 50%- und 95%-Monatsperzentile von SO₂ der 30-min Mittelwerte der Station Waldstein/Pflanzgarten.

	Rf	Si [%]
SO₂ P50 Jan	$y = -0.25x + 6.48$	99
SO₂ P95 Jan	$y = -2.01x + 48.49$	98
SO₂ P50 Feb	$y = -0.56x + 11.19$	91
SO₂ P95 Feb	$y = -3.33x + 68.75$	95
SO₂ P50 März	$y = -0.15x + 4.07$	94
SO₂ P95 März	$y = -2.58x + 53.24$	100
SO₂ P50 April	$y = -0.19x + 4.04$	100
SO₂ P95 April	$y = -2.16x + 43.35$	100
SO₂ P50 Mai	$y = -0.12x + 2.66$	99
SO₂ P95 Mai	$y = -1.69x + 35.01$	100
SO₂ P50 Juni	$y = -0.10x + 2.29$	100
SO₂ P95 Juni	$y = -0.90x + 19.99$	100
SO₂ P50 Juli	$y = -0.07x + 1.98$	98
SO₂ P95 Juli	$y = -0.92x + 19.95$	100
SO₂ P50 Aug	$y = -0.05x + 1.66$	83
SO₂ P95 Aug	$y = -0.55x + 15.18$	100
SO₂ P50 Sep	$y = -0.08x + 2.23$	95
SO₂ P95 Sep	$y = -1.47x + 30.65$	100
SO₂ P50 Okt	$y = -0.12x + 2.89$	99
SO₂ P95 Okt	$y = -1.86x + 36.83$	100
SO₂ P50 Nov	$y = -0.11x + 2.88$	95
SO₂ P95 Nov	$y = -1.61x + 32.82$	100
SO₂ P50 Dez	$y = -0.08x + 2.88$	98
SO₂ P95 Dez	$y = -1.52x + 37.32$	100

Tabelle 9.6: Gleichungen partieller linearer Regressionsfunktionen (Rf) und zugehörige Signifikanzen (Si) nach Mann-Kendall der 10%, 50%- und 95%-Monatsperzentile von Ozon der 30-min Mittelwerte der Station Waldstein/Pflanzgarten (a1: 1986-1997; b1: 1997-2007; a2: 1986-1995; b2: 1995-2007; a3: 1986-1999; b3: 1999-2007).

	Rf	Si [%]
O₃ P10_{a1} Jan	-----	-----
O₃ P10_{b1} Jan	-----	-----
O₃ P50_{a1} Jan	$y=1.00x+8.01$	90
O₃ P50_{b1} Jan	$y=-0.03x+22.72$	41
O₃ P95_{a1} Jan	$y=1.77x+15.48$	100
O₃ P95_{b1} Jan	$y=-0.90x+40.49$	98
O₃ P10_{a1} Feb	$y=0.93x+4.55$	82
O₃ P10_{b1} Feb	$y=-0.37x+17.57$	86
O₃ P50_{a1} Feb	$y=1.46x+13.32$	99
O₃ P50_{b1} Feb	$y=-0.59x+31.15$	86
O₃ P95_{a1} Feb	$y=1.69x+26.57$	87
O₃ P95_{b1} Feb	$y=-0.89x+44.68$	94
O₃ P10_{a1} März	$y=1.04x+8.32$	98
O₃ P10_{b1} März	$y=0.21x+18.98$	18
O₃ P50_{a1} März	$y=1.25x+19.28$	93
O₃ P50_{b1} März	$y=-0.04x+32.30$	12
O₃ P95_{a1} März	$y=1.30x+38.05$	87
O₃ P95_{b1} März	$y=0.18x+45.53$	69
O₃ P10_{a1} April	$y=0.94x+18.00$	94
O₃ P10_{b1} April	$y=-0.59x+27.73$	94
O₃ P50_{a1} April	$y=0.71x+32.71$	95
O₃ P50_{b1} April	$y=-0.34x+39.15$	76
O₃ P95_{a1} April	$y=1.29x+50.91$	75
O₃ P95_{b1} April	$y=-0.71x+60.71$	86
O₃ P10_{a1} Mai	$y=0.77x+16.48$	90
O₃ P10_{b1} Mai	$y=-1.07x+33.02$	75
O₃ P50_{a1} Mai	$y=1.16x+28.17$	90
O₃ P50_{b1} Mai	$y=-1.13x+46.53$	93
O₃ P95_{a1} Mai	$y=2.23x+40.45$	97
O₃ P95_{b1} Mai	$y=-1.27x+70.32$	81
O₃ P10_{a1} Juni	$y=0.86x+15.24$	98
O₃ P10_{b1} Juni	$y=-0.84x+29.89$	100
O₃ P50_{a1} Juni	$y=1.46x+25.45$	99
O₃ P50_{b1} Juni	$y=-0.82x+43.98$	96

O₃ P95_{a1} Juni	$y=2.35x+41.09$	100
O₃ P95_{b1} Juni	$y=-1.08x+68.38$	96
O₃ P10_{a2} Juli	$y=1.40x+12.41$	94
O₃ P10_{b2} Juli	$y=-0.57x+26.87$	98
O₃ P50_{a2} Juli	$y=2.18x+23.93$	94
O₃ P50_{b2} Juli	$y=-0.70x+41.81$	94
O₃ P95_{a2} Juli	$y=3.70x+44.85$	98
O₃ P95_{b2} Juli	$y=-0.35+65.08$	24
O₃ P10_{a2} Aug	$y=0.76x+14.66$	86
O₃ P10_{b2} Aug	$y=-0.52x+24.75$	95
O₃ P50_{a2} Aug	$y=1.79x+26.35$	98
O₃ P50_{b2} Aug	$y=-1.57x+46.69$	100
O₃ P95_{a2} Aug	$y=2.37x+50.32$	97
O₃ P95_{b2} Aug	$y=-2.22x+76.30$	99
O₃ P10_{a3} Sep	$y=0.62x+9.27$	95
O₃ P10_{b3} Sep	$y=-0.33x+16.29$	68
O₃ P50_{a3} Sep	$y=0.71x+20.75$	85
O₃ P50_{b3} Sep	$y=-0.43x+28.38$	10
O₃ P95_{a3} Sep	$y=1.03x+38.49$	59
O₃ P95_{b3} Sep	$y=-0.70x+52.96$	54
O₃ P10_{a1} Okt	$y=0.48x+5.40$	94
O₃ P10_{b1} Okt	$y=-0.28x+10.35$	67
O₃ P50_{a1} Okt	$y=0.54x+16.55$	85
O₃ P50_{b1} Okt	$y=-0.80x+24.55$	99
O₃ P95_{a1} Okt	$y=0.40x+32.20$	91
O₃ P95_{b1} Okt	$y=-1.19x+38.70$	98
O₃ P10_{a3} Nov	-----	-----
O₃ P10_{b3} Nov	-----	-----
O₃ P50_{a3} Nov	$y=0.66x+9.87$	100
O₃ P50_{b3} Nov	$y=-0.65x+18.20$	86
O₃ P95_{a3} Nov	$y=0.81x+22.30$	100
O₃ P95_{b3} Nov	$y=-1.00x+32.09$	78
O₃ P10_{a3} Dez	-----	-----
O₃ P10_{b3} Dez	-----	-----
O₃ P50_{a3} Dez	$y=0.85x+10.91$	100
O₃ P50_{b3} Dez	$y=-0.78x+20.83$	78
O₃ P95_{a3} Dez	$y=0.94x+24.10$	99
O₃ P95_{b3} Dez	$y=-0.36x+31.82$	68

Tabelle 9.7: Gleichungen partieller linearer Regressionsfunktionen (Rf) und zugehörige Signifikanzen (Si) nach Mann-Kendall der 50%- und 95%-Monatsperzentile von SO₂ der 30-min Mittelwerte der Station Waldstein/Pflanzgarten (a: 1985-1998; b: 1998-2006).

	Rf	Si [%]
SO₂ P50_a Jan	$y = -0.01x + 4.89$	65
SO₂ P50_b Jan	$y = -0.02x + 1.03$	33
SO₂ P95_a Jan	$y = -1.25x + 44.07$	10
SO₂ P95_b Jan	$y = 0.60x + 2.78$	60
SO₂ P50_a Feb	$y = -1.20x + 16.27$	91
SO₂ P50_b Feb	$y = 0.14x + 0.59$	47
SO₂ P95_a Feb	$y = -5.12x + 83.26$	90
SO₂ P95_b Feb	$y = 0.23x + 4.53$	54
SO₂ P50_a März	$y = -0.20x + 4.49$	91
SO₂ P50_b März	$y = 0.1x + 0.52$	71
SO₂ P95_a März	$y = -3.59x + 60.93$	95
SO₂ P95_b März	$y = 0.16x + 3.38$	0
SO₂ P50_a April	$y = -0.32x + 4.98$	100
SO₂ P50_b April	$y = 0.10x + 0.21$	86
SO₂ P95_a April	$y = -2.66x + 47.28$	100
SO₂ P95_b April	$y = 0.15x + 2.32$	0
SO₂ P50_a Mai	$y = -0.17x + 3.04$	97
SO₂ P50_b Mai	$y = 0.07x + 0.20$	83
SO₂ P95_a Mai	$y = -1.95x + 36.69$	99
SO₂ P95_b Mai	$y = -0.63x + 6.55$	98
SO₂ P50_a Juni	$y = -0.18x + 2.89$	100
SO₂ P50_b Juni	$y = 0.08x + 0.10$	90
SO₂ P95_a Juni	$y = -0.74x + 19.01$	70
SO₂ P95_b Juni	$y = -0.08x + 2.34$	54
SO₂ P50_a Juli	$y = -0.08x + 2.10$	98
SO₂ P50_b Juli	$y = 0.11x + 0.14$	97
SO₂ P95_a Juli	$y = -0.93x + 20.16$	88
SO₂ P95_b Juli	$y = 0.02x + 1.99$	20
SO₂ P50_a Aug	$y = -0.10x + 2.02$	96
SO₂ P50_b Aug	$y = 0.10x + 0.20$	93
SO₂ P95_a Aug	$y = -0.10x + 12.14$	17
SO₂ P95_b Aug	$y = 0.05x + 2.76$	20
SO₂ P50_a Sep	$y = -0.19x + 3.00$	100
SO₂ P50_b Sep	$y = 0.15x + 0.11$	100
SO₂ P95_a Sep	$y = -1.78x + 33.09$	92

SO ₂ P95 _b Sep	$y = -0.25x + 4.60$	83
SO ₂ P50 _a Okt	$y = -0.23x + 3.67$	100
SO ₂ P50 _b Okt	$y = 0.17x + 0.19$	99
SO ₂ P95 _a Okt	$y = -2.48x + 41.36$	99
SO ₂ P95 _b Okt	$y = 0.35x + 1.88$	12
SO ₂ P50 _a Nov	$y = -0.20x + 3.43$	97
SO ₂ P50 _b Nov	$y = 0.00x + 0.98$	39
SO ₂ P95 _a Nov	$y = -1.86x + 34.56$	93
SO ₂ P95 _b Nov	$y = -0.95x + 8.03$	47
SO ₂ P50 _a Dez	$y = 0.07x + 1.95$	46
SO ₂ P50 _b Dez	$y = -0.12x + 1.46$	74
SO ₂ P95 _a Dez	$y = -0.58x + 31.83$	34
SO ₂ P95 _b Dez	$y = -0.72x + 8.67$	94

Tabelle 9.8: Gleichungen und lineare Regressionsfunktionen (Rf) und zugehörige Signifikanzen (Si) nach Mann-Kendall der Minimum- und Maximumentwicklung der Typ A Ozonepisoden im Episodenverlauf unter Verwendung von über 12 Stunden tiefpassgefilterten Werten der Station Waldstein/Pflanzgarten zwischen 1994 und 2007.

Episodenbezeichnung	Rampenminima: Rf	Rampeminima: Si [%]	Rampenmaxima: Rf	Rampenmaxima: Si [%]
R1	$y = 1.90x + 19.20$	52	$y = 2.57x + 41.53$	100
R2	$y = 1.85x + 17.88$	99	$y = 2.25x + 34.68$	100
R3	$y = 0.88x + 18.06$	89	$y = 2.41x + 26.24$	100
R4	$y = 3.48x + 8.15$	100	$y = 4.20x + 26.77$	100
R5	$y = 2.51x + 7.59$	92	$y = 3.84x + 16.95$	100
R6	$y = 1.13x + 17.82$	96	$y = 2.10x + 26.98$	100
R7	$y = 1.79x + 26.74$	97	$y = 2.33x + 42.92$	97
R8	$y = 3.00x + 13.58$	100	$y = 3.63x + 29.20$	100
R9	$y = 2.93x + 17.94$	55	$y = 5.63x + 32.69$	98
R10	$y = 5.36x + 18.49$	99	$y = 7.60x + 30.32$	100
R11	$y = 2.95x + 15.41$	99	$y = 6.77x + 20.32$	100
R12	$y = 1.88x + 19.24$	99	$y = 3.21x + 37.57$	94
R13	$y = 1.86x + 19.08$	99	$y = 2.32x + 39.25$	100
R14	$y = 2.00x + 16.57$	100	$y = 2.34x + 38.16$	100
R15	$y = 6.79x + 18.35$	86	$y = 8.22x + 46.90$	99
R16	$y = 2.48x + 27.29$	100	$y = 3.22x + 41.52$	100
R17	$y = 2.97x + 27.68$	98	$y = 3.88x + 48.89$	99
R18	$y = 1.67x + 20.94$	99	$y = 3.33x + 34.42$	100

Tabelle 9.9: Gleichungen und lineare Regressionsfunktionen (Rf) und zugehörige Signifikanzen (Si) nach Mann-Kendall der Minimum- und Maximumentwicklung im rampenartigen Abschnitt der Typ B Ozonepisoden im Episodenverlauf unter Verwendung von über 12 Stunden tiefpassgefilterten Werten der Station Waldstein/Pflanzgarten zwischen 1994 und 2007.

Episodenbezeichnung	Rampenminima: Rf	Rampeminima: Si [%]	Rampenmaxima: Rf	Rampenmaxima: Si [%]
RP1	$y=7.19x+3.65$	96	$y=7.90x+27.30$	96
RP2	$y=16.35x+10$	88	$y=10.80x+46.93$	88
RP3	$y=10.80x-2.40$	88	$y=10.70x+17.86$	88
RP4	$y=4.50x+12.86$	95	$y=6.70x+30.20$	99
RP5	$y=3.51x+12.53$	100	$y=6.27x+23.94$	98
RP6	$y=5.17x+8.29$	99	$y=7.45x+23.89$	95
RP7	$y=2.10x+7.09$	100	$y=2.85x+14.21$	100

Tabelle 9.10: Gleichungen und lineare Regressionsfunktionen (Rf) und zugehörige Signifikanzen (Si) nach Mann-Kendall der Amplitudenentwicklung der Typ A Ozonepisoden im Episodenverlauf unter Verwendung von über 12 Stunden tiefpassgefilterten Werten der Station Waldstein/Pflanzgarten zwischen 1994 und 2007.

Episodenbezeichnung	Rf	Si [%]
R1	$y=0.67x+22.27$	90
R2	$y=0.41x+16.70$	61
R3	$y=1.53x+8.15$	99
R4	$y=0.73x+18.57$	69
R5	$y=1.33x+9.35$	96
R6	$y=0.97x+9.14$	98
R7	$y=0.54x+16.14$	58
R8	$y=0.64x+15.57$	78
R9	$y=2.70x+14.69$	82
R10	$y=2.25x+11.74$	97
R11	$y=3.82x+4.83$	99
R12	$y=1.33x+18.24$	86
R13	$y=0.46x+20.10$	15
R14	$y=0.35x+21.53$	7
R15	$y=1.44x+28.48$	20
R16	$y=0.74x+14.19$	78
R17	$y=0.90x+21.18$	32
R18	$y=1.66x+13.48$	99

Tabelle 9.11: Gleichungen und lineare Regressionsfunktionen (Rf) und zugehörige Signifikanzen (Si) nach Mann-Kendall der Amplitudenentwicklung der Typ B Ozonepisoden bei rampenartigem Konzentrationsanstieg und bei Plateaubildung gegen Ende der Ozonphase unter Verwendung von über 12 Stunden tiefpassgefilterten Werten der Station Waldstein/Pflanzgarten zwischen 1994 und 2007.

Episodenbezeichnung	Rampe: Rf	Rampe: Si [%]	Plateau: Rf	Plateau: Si [%]
RP1	$y=0.74x+23.55$	0	$y=-1.81x+23.57$	35
RP2	$y=-5.50x+36.77$	88	$y=0.32x+23.28$	60
RP3	$y=-0.15x+20.33$	40	$y=-0.45x+19.60$	50
RP4	$y=2.20x+17.34$	86	$y=0.45x+19.09$	52
RP5	$y=2.76x+11.41$	90	$y=-0.34x+32.98$	47
RP6	$y=2.30x+15.50$	86	$y=-0.12x+22.97$	6
RP7	$y=0.75x+7.11$	99	$y=0.00x+15.20$	0

Tabelle 9.12: Gleichungen und lineare Regressionsfunktionen (Rf) und zugehörige Signifikanzen (Si) nach Mann-Kendall der Amplitudenentwicklung der Typ C Ozonepisoden im Episodenverlauf unter Verwendung von über 12 Stunden tiefpassgefilterten Werten der Station Waldstein/Pflanzgarten zwischen 1994 und 2007.

Episodenbezeichnung	Rf	Si [%]
P1	$y=-0.08x+20.48$	51
P2	$y=1.34x+27.20$	38
P3	$y=0.86x+25.61$	58
P4	$y=0.23x+18.42$	68
P5	$y=-0.25x+25.96$	23
P6	$y=-0.64x+32.92$	85
P7	$y=-0.33x+27.06$	38

Bisher erschienene Bände der Reihe „Arbeitsergebnisse, Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie“

Nr	Author(s)	Title	Year
01	Foken	Der Bayreuther Turbulenzknecht	01/1999
02	Foken	Methode zur Bestimmung der trockenen Deposition von Bor	02/1999
03	Liu	Error analysis of the modified Bowen ratio method	02/1999
04	Foken et al.	Nachfrostgefährdung des ÖBG	03/1999
05	Hierteis	Dokumentation des Experimentes Dlouhá Louka	03/1999
06	Mangold	Dokumentation des Experimentes am Standort Weidenbrunnen, Juli/August 1998	07/1999
07	Heinz et al.	Strukturanalyse der atmosphärischen Turbulenz mittels Wavelet-Verfahren zur Bestimmung von Austauschprozessen über dem antarktischen Schelfeis	07/1999
08	Foken	Comparison of the sonic anemometer Young Model 81000 during VOITEX-99	10/1999
09	Foken et al.	Lufthygienisch-bioklimatische Kennzeichnung des oberen Egertales, Zwischenbericht 1999	11/1999
10	Sodemann	Stationsdatenbank zum BStMLU-Projekt Lufthygienisch-bioklimatische Kennzeichnung des oberen Egertales	03/2000
11	Neuner	Dokumentation zur Erstellung der meteorologischen Eingabedaten für das Modell BEKLIMA	10/2000
12	Foken et al.	Dokumentation des Experimentes VOITEX-99	10/2000
13	Bruckmeier et al.	Documenation of the experiment EBEX-2000, July 20 to August 24, 2000	01/2001
14	Foken et al.	Lufthygienisch-bioklimatische Kennzeichnung des oberen Egertales	02/2001
15	Göckede	Die Verwendung des Footprint-Modells nach Schmid (1997) zur stabilitätsabhängigen Bestimmung der Rauigkeitslänge	03/2001
16	Neuner	Berechnung der Evaporation im ÖBG (Universität Bayreuth) mit dem SVAT-Modell BEKLIMA	05/2001
17	Sodemann	Dokumentation der Software zur Bearbeitung der FINTUREX-Daten	08/2002
18	Göckede et al.	Dokumentation des Experiments STINHO-1	08/2002
19	Göckede et al.	Dokumentation des Experiments STINHO-2	12/2002
20	Göckede et al.	Characterisation of a complex measuring site for flux measurements	12/2002
21	Liebenthal	Strahlungsmessgerätevergleich während des Experiments STINHO-1	01/2003
22	Mauder et al.	Dokumentation des Experiments EVA_GRIPS	03/2003
23	Mauder et al.	Dokumentation des Experimentes LITFASS-2003, Dokumentation des Experimentes GRASATEM-2003	12/2003
24	Thomas et al.	Documentation of the WALDATEM-2003 Experiment	05/2004
25	Göckede et al.	Qualitätsbegutachtung komplexer mikrometeorologischer Messstationen im Rahmen des VERTIKO-Projekts	11/2004
26	Mauder & Foken	Documentation and instruction manual of the eddy covariance software package TK2	12/2004
27	Herold et al.	The OP-2 open path infrared gas analyser for CO ₂ and H ₂ O	01/2005
28	Ruppert	ATEM software for atmospheric turbulent exchange measurements using eddy covariance and relaxed eddy accumulation systems and Bayreuth whole-air REA system setup	04/2005
29	Foken (Ed.)	Klimatologische und mikrometeorologische Forschungen im Rahmen des Bayreuther Institutes für Terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK), 1989-2004	06/2005
30	Siebeke & Serafimovich	Ultraschallanemometer-Überprüfung im Windkanal der TU Dresden 2007	04/2007

Nr	Author(s)	Title	Year
31	Lüers & Bareiss	The Arctic Turbulence Experiment 2006 PART 1: Technical documentation of the ARCTEX 2006 campaign, May, 2nd to May, 20th 2006	08/2007
32	Lüers & Bareiss	The Arctic Turbulence Experiment 2006 PART 2: Near surface measurements during the ARCTEX 2006 campaign, May, 2nd to May, 20th 2006	08/2007
33	Bareiss & Lüers	The Arctic Turbulence Experiment 2006 PART 3: Aerological measurements during the ARCTEX 2006 campaign, May, 2nd to May, 20th 2006	08/2007
34	Metzger & Foken et al.	COPS experiment, Convective and orographically induced precipitation study, 01 June 2007 – 31 August 2007, Documentation	09/2007
35	Staudt & Foken	Documentation of reference data for the experimental areas of the Bayreuth Centre for Ecology and Environmental Research (BayCEER) at the Waldstein site	11/2007
36	Serafimovich et al.	ExchanGE processes in mountainous Regions (EGER) - Documentation of the Intensive Observation Period (IOP1), September, 6th to October, 7th 2007	01/2008
37	Serafimovich et al.	ExchanGE processes in mountainous Regions (EGER) - Documentation of the Intensive Observation Period (IOP2), June, 1st to July, 15th 2008	10/2008
38	Siebicke	Footprint synthesis for the FLUXNET site Waldstein/Weidenbrunnen (DE-Bay) during the EGER experiment.	12/2008
39	Lüers & Foken	Jahresbericht 2008 zum Förderprojekt 01879 – Untersuchung der Veränderung der Konzentration von Luftbeimengungen und Treibhausgasen im hohen Fichtelgebirge, 2007 – 2013	01/2009
40	Lüers & Foken (Eds.)	Proceedings of the International Conference of "Atmospheric Transport and Chemistry in Forest Ecosystems" Castle of Thurnau, Germany, Oct 5 to Oct 8, 2009	10/2009
41	Biermann et al.	Mesoscale circulations and energy and gas exchange over the Tibetan Plateau – Documentation of the micrometeorological experiment, Nam Tso, Tibet , 25 June 2009 – 08 August 2009	12/2009
42	Foken & Falke	Documentation and Instruction Manual for the Krypton Hygrometer Calibration Instrument	01/2010
43	Lüers & Foken	Jahresbericht 2009 zum Förderprojekt 01879 – Untersuchung der Veränderung der Konzentration von Luftbeimengungen und Treibhausgasen im hohen Fichtelgebirge, 2007 – 2013	07/2010